

地下建設における 2 液混合噴流の  
地盤掘削特性および地中支障物の切削性  
に関する研究

Study on the Characteristics of Dual-Fluid Jets  
For the Soil Excavation and the Obstacles  
Cutting in Underground Construction

2018 年 2 月

神山 守

Mamoru KAMIYAMA



地下建設における 2 液混合噴流の  
地盤掘削特性および地中支障物の切削性  
に関する研究

Study on the Characteristics of Dual-Fluid Jets  
For the Soil Excavation and the Obstacles  
Cutting in Underground Construction

2018 年 2 月

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

神山 守

Mamoru KAMIYAMA





## 目 次

### 第 1 章 緒論

1-1 研究に至る経緯	1-1
1-2 研究課題と方針	1-2
1-2-1 研究課題	1-2
1-2-2 研究方針	1-3
1-3 本論文の構成	1-6
1-4 用語の定義	1-6
[参考文献]	1-9

### 第 2 章 下水道事業におけるトンネル技術の変遷と課題

2-1 はじめに	2-1
2-2 東京都における下水道整備の変遷	2-2
2-2-1 草創期の下水道整備	2-2
2-2-2 東京都区部下水道の 100% 普及への道のり	2-3
2-3 我が国のトンネル技術の導入と変遷	2-7
2-3-1 日本で最初のトンネル	2-7
2-3-2 シールド工法の導入	2-7
2-3-3 東京都におけるシールド工法導入の経緯	2-8
2-3-4 シールド技術の変遷	2-10
2-3-5 特殊条件下における施工技術の変遷	2-12
2-3-6 都市の課題に挑戦するべく多様化するシールド技術	2-15
2-4 トンネル技術の発展に貢献した下水道事業	2-15
2-4-1 下水道普及までの施工技術	2-15
2-4-2 推進工法	2-16
2-4-3 シールド工法	2-17
2-5 都市域におけるトンネル技術の課題	2-20
2-5-1 地上への影響をより少なくする工夫	2-20
2-5-2 工事期間を短くする工夫	2-21
2-5-3 既設構造物への影響を最小限とする工夫	2-21
[参考文献]	2-22

### 第 3 章 超高圧ジェット噴流を活用したトンネル技術の開発

3-1 はじめに	3-1
3-2 支障物処理の従来工法とその課題	3-1
3-2-1 地上からの撤去	3-1
3-2-2 掘進機内から人力による撤去	3-1

3-2-3 シールド機による直接切削	3-2
3-3 超高压噴流技術によるトンネル工法の開発経緯と特徴	3-2
3-3-1 超高压ジェット噴流技術の適用	3-2
3-3-2 超高压噴流技術の開発コンセプト	3-3
3-3-3 D0-Jet 工法のシステムと実績	3-5
3-4 小・中口径掘進機の開発	3-7
3-5 掘進機的设计	3-8
3-5-1 掘進機の構造検討および設計	3-8
3-5-2 切断用ノズルの配置検討	3-8
3-5-3 最大切断片の取込みに関する検討	3-9
3-5-4 地盤改良用ノズルの配置検討	3-10
3-5-5 ノズル以外のD0-Jet 工法の機能の装備について	3-11
3-5-6 掘進機の構造検討	3-14
3-5-7 基本設計および検討結果のまとめ	3-16
3-6 口径 1000mm 対応の超高压ジェットシステム	3-17
3-6-1 前方探査技術の評価	3-18
3-6-2 超高压地盤改良技術の評価	3-24
3-6-3 切断および切断片除去技術の評価	3-39
3-6-4 「前方探査技術」「超高压地盤改良技術」「切断および切断片 除去技術」の適用範囲拡大実験のまとめ	3-53
3-6-5 口径 800mm～1350mm の施工実績	3-56
[参考文献]	3-57

#### 第4章 地盤改良用2液混合噴流の地盤掘削特性に関する研究

4-1 研究の背景	4-1
4-2 研究の概要	4-1
4-3 実験装置の製作	4-2
4-3-1 圧力容器の仕様	4-2
4-3-2 動圧測定センサの仕様	4-3
4-3-3 動圧測定センサの精度確認	4-4
4-3-4 ミキシング室内の噴流特性	4-6
4-4 加圧水中における噴流状態の目視観察	4-7
4-5 ノズル内の混合過程のモデル化とその検証	4-8
4-5-1 運動量保存則による混合噴流の噴出速度	4-8
4-5-2 算出された流速の検証	4-9
4-6 水中における噴流の動圧の測定	4-12
4-6-1 実験条件	4-12

4-6-2	実験結果	-----	4-12
4-6-3	まとめ	-----	4-15
4-7	乱流モデルによる水中における噴流の流動特性の FVM 解析	----	4-16
4-7-1	定常解析モデル	-----	4-16
4-7-2	解析結果	-----	4-17
4-7-3	FVM 解析のまとめ	-----	4-21
4-8	模擬地盤の掘削実験	-----	4-21
4-8-1	可視化用透明容器の製作	-----	4-21
4-8-2	模擬地盤の作製方法	-----	4-21
4-8-3	可視化容器を用いた掘削実験	-----	4-22
4-9	混相流モデルによる地盤掘削過程の FVM 解析	-----	4-25
4-10	現状の地盤改良計画の評価	-----	4-27
4-11	まとめ	-----	4-28
4-11-1	2 液混合噴流の動圧分布	-----	4-28
4-11-2	地盤の掘削実験	-----	4-28
4-11-3	FVM 解析	-----	4-28
4-11-4	今後の課題	-----	4-29
[参考文献]			----- 4-30

## 第 5 章 2 液混合噴流による地中支障物の切削性に関する研究

5-1	本研究の目的	-----	5-1
5-2	高水压下にある奥行き 300mm を超える支障物に対する D0-Jet 工法の適用性	-----	5-1
5-3	検証実験の概要	-----	5-2
5-4	適用性を検証する工事の概要	-----	5-2
5-5	超高圧ジェット噴流の事前の確認実験と考察	-----	5-4
5-5-1	実験場所および実験装置の概要	-----	5-4
5-5-2	実験機器	-----	5-4
5-6	気中環境における切断能力確認実験（実験 case1）	-----	5-5
5-6-1	実験方法	-----	5-5
5-6-2	圧力容器内の圧力が切断能力に与える影響の把握	-----	5-8
5-6-3	噴射材料が切断能力に与える影響の把握	-----	5-8
5-6-4	噴射ノズルの適正な移動速度の把握	-----	5-8
5-6-5	実験結果	-----	5-9
5-7	気中環境における切断能力確認実験のまとめ	-----	5-15
5-8	土中切断および改良体確認実験（実験 case2）	-----	5-16
5-8-1	実験方法	-----	5-16

5-8-2 実験結果	5-18
5-9 土中切断および改良体確認実験のまとめ	5-31
5-9-1 土中切断	5-31
5-9-2 土中切断後の改良材の置換え	5-31
5-10 まとめ	5-31
[参考文献]	5-33

## 第6章 結論

6-1 本研究の結論	6-1
6-1-1 D0-Jet 工法の小・中口径トンネルへの適用拡大	6-1
6-1-2 D0-Jet 工法における2液混合噴流が地盤等へ与える影響の解明	6-2
6-1-3 D0-Jet 工法における2液混合噴流の支障物の切削性の解明	6-2
6-2 今後の課題	6-3

謝辞

研究業績

## 第 1 章 緒論

### 1-1 研究に至る経緯

下水道は、汚水の収集および処理、雨水の排除という機能を有し、生活環境の改善や公衆衛生の向上、浸水の防除、さらには、河川等の公共用水域の水質保全を図るための重要な施設であり、市民の生活や都市の機能を支えている。

著者が下水道事業に携わるようになった 1991 年当時の下水道事業最大の目標は、東京都区部の下水道を 1995 年 3 月までに 100% 普及させることであった。同時に、長年の組織目標である 100% 普及達成後の下水道事業が抱えている諸課題の解決に道筋をつけ、事業を的確に軌道に乗せていくことであった。その一つが、下水道普及促進の陰にあって対処療法的な取り組みにとどまっていた老朽化対策を着実、円滑に展開できるようにすることであり、そのための調査、研究が精力的に行われていた。そのような中であって、著者は住宅密集地での推進工事やシールド工事などの現場経験を踏まえた計画づくりに取り組むこととなった。

下水道の老朽化とは、経年的な劣化と、機能や能力が低下して所定の下水道の役割を担うことができない状態をいう。すなわち、下水道管きょを例にとると、前者による状態とそれに起因する現象としては、管路に生じたひび割れや抜け出しなどと、道路陥没の発生や下水の地山への流出による地下水汚染、後者は都市化の進展に伴う雨水流出量の増加に伴う雨水排除能力の不足とそれによる浸水被害の発生といったことが挙げられる。このような老朽化への対応を計画的に行う事業を再構築事業と定義して計画づくりを進めた。

その後、施設建設の現場責任者として計画に沿って実際に再構築事業の設計や工事を指揮する立場になり、それまでとは異なる課題に遭遇することになった。すなわち、非開削のトンネル工事において鋼矢板や H 形鋼などの仮設材が土中に残置された現場に遭遇することが多々あり、推進工事やシールド工事を施工する上で障害になっていた。この問題は、事前に支障物の存在が判っている場合と判っていない場合とでは対処の方法が異なる。判っている場合は、埋設位置を変更することになるが、現実的には変更して下水道管きょを埋設できるスペースが限られているのが実態である。施工中に判明した場合は、一般的には路上から開削により支障物を撤去することを検討することになるが、鋼材などを残置してしまった原因が、撤去することができない施工環境であったことに起因したものがほとんどであり、その場合は工事の中断を余儀なくされることになる。いずれの場合も再構築事業を円滑に進めることができなくなり、下水道事業を推進する上で大きな課題となっている。

東京都下水道局では、この課題に対して非開削で、推進あるいはシールド機

内から支障物を切断、除去できる技術が事業を推進して行く上で必要であると考え、その実現のために、下水道局の指導の下、下水道局の監理団体である東京都下水道サービス株式会社（以下「TGS」と呼ぶ）が民間企業との共同研究、技術開発に取り組んだ。その結果、開発、実用化され多くの現場で適用されるようになった工法が D0-Jet 工法（Double Object Jet Method）である。

一方、D0-Jet 工法の採用が拡大するにつれて新たな課題が発現してきた。すなわち、採用機会の多い小・中口径への適用ができないか、切断等に用いる超高压ジェット噴流が地盤内で悪影響を及ぼすことはないか、地下埋設部の輻輳により下水道管きょの布設位置が深くなったため、高水压下での施工はどのように行うことが合理的なのか、といったことなどである。

## 1-2 研究課題と方針

### 1-2-1 研究課題

東京都区部の下水道はほぼ普及率 100%になっているものの、大正、昭和初期に建設された下水道施設、取り分け下水道管きょはひび割れや破損あるいは鉄筋の腐食といった老朽化が進んでおり、その対策が急がれている。また、道路の舗装化や都市開発の進展等による雨水浸透能力の低下が下水道への雨水流出量を増加させ、結果的に雨水排除能力が不足するようになっている。さらに、近年頻発する局地的な集中豪雨により浸水被害が頻発するようになっている。このため、東京都では老朽化対策や浸水対策としての再構築事業を鋭意進めているところである。

再構築事業では、比較的小口径な管きょについては、更生工法で管内面を巻きたてるなどして再生したり、開削工法により管きょの入れ替えを行う工事を行っている。大口径な管きょについては、工事による地盤沈下による影響や道路交通への影響、輻輳する地下埋設物の存在などの制約から非開削工法である推進工法やシールド工法が多用されている。東京都下水道局では、従来よりシールド掘進に伴う地盤変状と周辺家屋との関係等について現場計測をはじめとした調査研究を行い、地盤沈下のメカニズムやその解析手法などについての知見<sup>1)</sup><sup>2)</sup><sup>3)</sup>を蓄積してきている。一方、近年課題となっているシールド工事などにおける地中支障物の問題、地中に残置され施工時に支障となる事案に対する施工技術については確たるものは有していない状況にあった。このため、東京都下水道局と TGS は、2002 年頃から超高压ジェット噴流を活用した切削技術を有する民間企業（ジェットモール工法開発企業）などと、支障物を安全、確実に除去できるとともに、周辺構造物などにも影響などを与えることがない技術を共同で開発、実用化<sup>4)</sup>してきた。この技術が D0-Jet 工法で、口径 1500mm

以上の規模の管きょ断面を対象としたものであった。

一方、D0-Jet 工法の採用が拡大するにつれて新たに以下の課題が発現してきた。

- ① 採用機会の多い小・中口径への適用拡大ができないか
- ② 支障物の切断等に用いる超高圧ジェット噴流が地盤や近接構造物にどのような影響を与えているのか
- ③ 大深度の高水圧下でも効率的に施工ができないか

著者は、これらの課題に対して、実務的な対応とともに実験的な方法により解決策を探るための研究を進めることとした。

## 1-2-2 研究方針

前述した研究課題①に対しては、次のような取り組みを行った。従来の口径1500mm以上の掘進機が備えているD0-Jet工法の機能である、地中の障害物や構造物の位置を明らかにする探査技術（前方探査技術）、地中の構造物に影響を与えることなく周辺地盤を改良する技術（超高圧地盤改良技術）、地中の障害物を超高圧噴射システムにより切断および除去する技術（切断および除去技術）を基本に、小・中口径の掘進機が同様の機能を発揮できるようにするための研究開発である。本研究は、これまでの実務経験などを基に、実際に口径1000mmの掘進機を製作し、この掘進機を実験フィールド土中に埋設して所定の性能（前方探査技術、超高圧地盤改良技術、切断および除去技術）の確認を行うなど実証的な取り組みを行うことにした。

研究課題②に対しては、超高圧ジェット噴流の地盤内での挙動を明らかにすることである。この課題に対しては、以下のような取り組みを行うこととした。D0-Jet工法による超高圧水が地中ではどのような現象を引き起こし、どのような影響を与えているのか、実際の現場では地中での挙動を計測する手段がなかったため、定量的には把握できていない。そこで著者らは、超高圧水の実際の地盤中での挙動および超高圧水による近接構造物への影響や地盤改良範囲を定量的に把握するための調査研究<sup>5), 6)</sup>を実施することとし、大型の圧力容器中に模擬地盤を作製して超高圧水の動圧の測定と地盤の掘削過程を再現した実験などを行うことにした。

最後に研究課題③についてである。東京都江東区において地下鉄工事施工時に大型の支障物が残置されている場所で、下水道管きょをシールド工事で施工することになった。この現場は、地下水位が高い軟弱な沖積層に位置し、土被り約30mと埋設深度が深い。課題②の研究において超高圧ジェット噴流の影響範囲などは明らかにすることはできたものの、水圧の高い大深度工事における切削能力や支障物背面への影響などの詳細は把握できていないことから、施

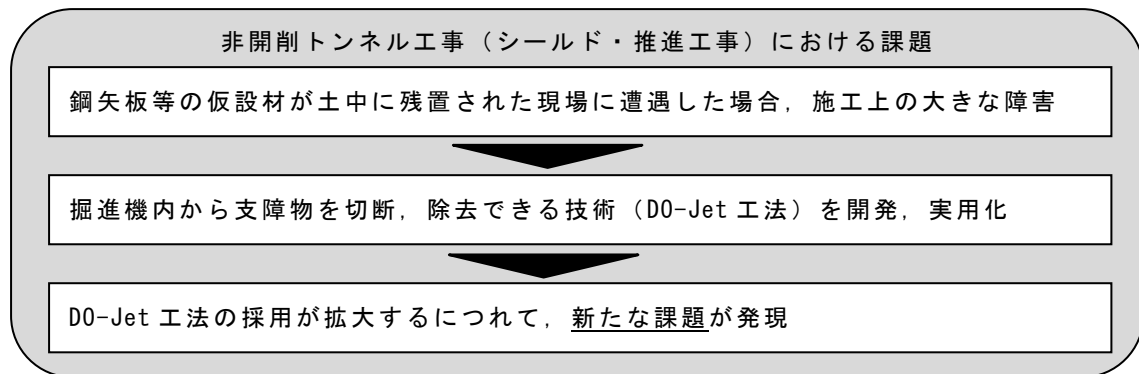
工の安全性や効率性の観点から調査研究することにした。本調査研究では、大型圧力容器を用いて、支障物が残置されている状態を再現した模擬地盤を作製し、気中と水圧が作用した場合の違いによる切削能力等を調査研究<sup>7)</sup>することとした。

この結果から、実際の大深度（高水圧）の現場での施工性を向上させる方法としては、切羽前面に圧気（限定圧気）を作用させることが考えられた。そこで、同様の圧力容器を用いて容器内に圧気状態を再現して、切削能力の改善などを実証するための研究を行うことにした。

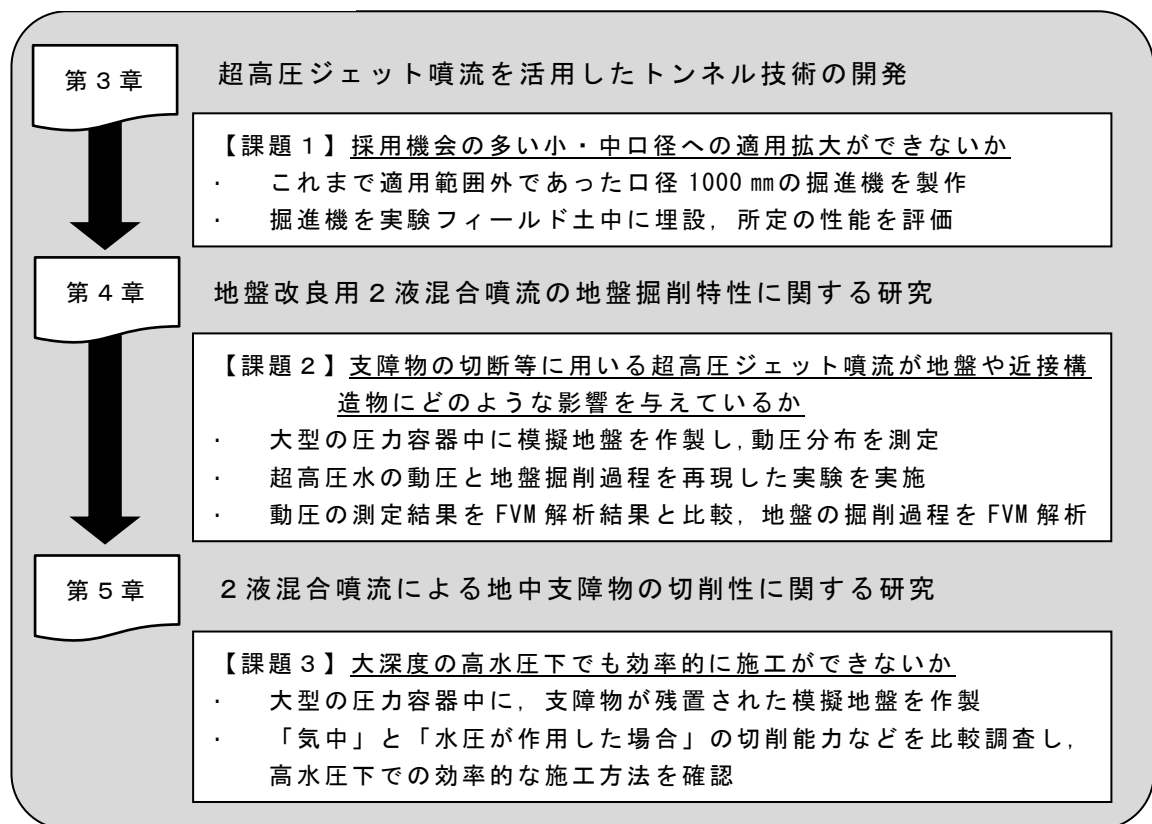
以上述べた本研究の概要を図 1-1 に示す。



## 【本研究の背景】



## 【研究課題と方針】



## 【本研究の結論】

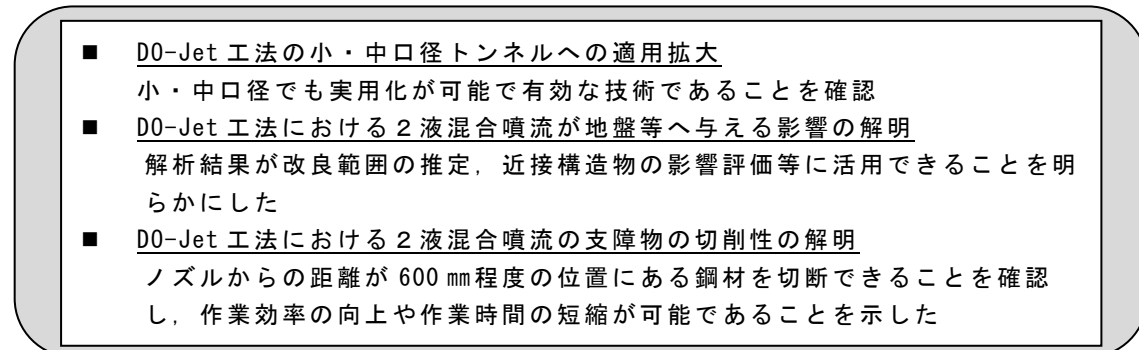


図 1-1 本研究の概要

### 1-3 本論文の構成

本論文は 6 章から構成されており、その概要は以下のとおりである。

第 1 章では、研究に至る背景、研究課題と方針、本論文の構成、および用語の定義を述べている。

第 2 章では、東京都における下水道整備の変遷、我が国のトンネル技術の導入と変遷、トンネル技術の発展に貢献した下水道事業、都市域におけるトンネル技術の課題について述べている。

第 3 章では、シールド等トンネル工事における支障物の処理に関する従来工法とその課題について述べるとともに、これまでの実務経験などを基に口径 1000mm に対応する掘進機を試作し、「前方探査技術」、「超高压地盤改良技術」、「切断および除去技術」に関する各種実験を行い、これまで適用範囲外であった口径 1000mm における D0-Jet 工法の基本性能を評価した結果を述べている。

第 4 章では、D0-Jet 工法の 2 液混合噴流が及ぼす影響範囲や地盤改良範囲を明らかにするために行った実験的研究について述べている。地盤中での 2 液混合噴流と地盤との相互挙動を実際の現場では計測することができないため、実験では、大型の圧力容器中に模型地盤を作製して超高压水の動圧と地盤の掘削過程を再現し、その挙動を観察した。さらに、2 液混合噴流に関する FVM 解析を行い、実験結果と比較検討した内容などを述べている。

第 5 章では、大深度で大型の支障物が残置されているシールド工事を効率的、安全に施工するために行った D0-Jet 工法の施工の効率性に関する研究について述べている。D0-Jet 工法で安全、確実に切断することが可能な支障物の奥行きは、鋼材で 300mm 程度である。奥行きが 300mm を超える支障物に遭遇した場合は、2 回以上の切断を行う必要があるため、切断作業回数が増え工事期間が長期化する。このため、地下水圧の違いによる切削性能を確認した上で、効率的な施工を行うために切羽前面を限定的に圧気することで地下水圧を軽減した状況で支障物の切断および除去の効率を向上させる方法を研究した成果を述べている。

第 6 章では、本研究の成果を結論として述べるとともに、今後の課題にも言及している。

### 1-4 用語の定義

本論文で用いた用語のうち、シールド工法および地盤改良並びにトンネル工事における地中の支障物の除去において一般的に用いられている用語以外について、以下のように定義する。

- ・アブレシブ

支障物を切断するために用いる研磨剤をいう。研磨剤には環境基準に適したガーネットを用いている。

- ・アブレシブジェット

支障物を切断するために、切断用ノズルから超高压で噴射される研磨剤を含んだ粉粒体をいう。

- ・アブレシブスラリー

支障物を切断するために用いる、研磨剤と硬化剤およびポリマー溶液の混合液をいう。

- ・アブレシブライン

アブレシブスラリーまたはセメントミルクをミキシング室まで圧送する系列のことであり、アブレシブスラリーまたはセメントミルクの供給装置から、圧送ホース、超高压複合スイベル、超高压メインシャフト、カッターヘッド内超高压配管およびホース類、超高压噴射ノズルまでをいう。

- ・加泥材

超高压地盤改良前の切羽保持とアブレシブスラリーや超高压地盤改良材のチャンバ内の付着防止や閉塞防止のために注入する粘土系の添加材をいう。

- ・給水フィルタユニット

超高压発生装置に送る水道水または井戸水などに含まれる微粒子を、膜ろ過などによって除去する装置をいう。

- ・珪酸ナトリウム溶液供給装置

カッターヘッド前方における支障物の有無の探査時や超高压地盤改良時および切断時において使用する珪酸ナトリウム溶液を攪拌し供給する装置をいう。

- ・ジェットライン

超高压ジェット水を超高压噴射ノズルの噴射口まで圧送する系統のことであり、超高压発生装置から超高压ホース、超高压ロータリージョイント、ライン切替ユニット、超高压複合スイベル、超高压メインシャフト、カッターヘッド内超高压配管およびホース類、超高压噴射ノズルまでをいう。

- ・スラリー攪拌装置

アブレシブスラリーを製造するために研磨剤と硬化剤およびポリマー溶液を調合し攪拌混合をする装置をいう。

- ・スラリー供給装置

スラリー攪拌装置で製造したアブレシブスラリーを圧送する装置、または前方探査時の硬化剤溶液を圧送する装置をいう。

- ・切断材

超高压ジェットにおいて、噴射して支障物を切断する材料のことをいう。木材や巨石、岩盤等を切断する場合は、超高压ジェット水(溶液型注入材等)を用い、鋼材類を切断する場合は、アブレシブスラリーと珪酸ナトリウム溶液の混合材を用いる。

- ・切断および除去システム

切断施工図を基に超高压のアブレシブジェットによって支柱障害物の切断と除去を行う一連のシステムをいう。

- ・切断用ノズル

支障物を切断するためにカッターヘッドおよびオーバカッターに装備したノズルをいう。

- ・超高压

10Mpa 以上（最大 245MPa）の圧力を超高压という。

- ・超高压ジェット

「前方探査」、「超高压地盤改良」、「切断および除去」のそれぞれの目的に応じて、切断用ノズルまたは地盤改良用ノズルから噴射する超高压の粉粒体の総称をいう。

- ・低压

1.0MPa 程度の圧力を低压という。

- ・低压ジェット

「前方探査」、「切断および除去」のそれぞれの目的に応じて、アブレシブラインからミキシング室に低压（1 MPa）で送られる硬化剤溶液またはアブレシブスラリーをいう。

- ・2 液混合噴流

超高压ジェットと低压ジェットを混合して噴射する方式をいう。

## 〔参考文献〕

- 1) 下水道シールド工事における地盤沈下対策（その 1） 間片博之 下水道協会誌 Vol.17, No.191, 1980
- 2) 下水道シールド工事における地盤沈下対策（その 2） 間片博之 下水道協会誌 Vol.17, No.192, 1980
- 3) 下水道シールド工事における地盤沈下対策（その 3） 間片博之 下水道協会誌 Vol.17, No.193, 1980
- 4) 地中障害物対策を駆使したシールド施工-東京都下水道王子西一号幹線- 神山守, 岡本順, 坂本久之 日本トンネル技術協会誌 トンネルと地下 Vol.47, No.8, pp.59-67, 2016
- 5) Do-Jet 工法における超高压 2 液混合ジェット噴流の影響範囲に関する実験的研究 神山守, 小泉淳, 磯部隆寿, 岩佐行利 日本トンネル技術協会誌 トンネルと地下 Vol.47, No.11, pp.47-52, 2016
- 6) 支障物撤去型掘進工法における地盤改良二液混合噴流の地盤掘削特性に関する研究 神山守, 小泉淳, 磯部隆寿, 田中雅彦, 志村洋平 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.73, No.2, pp.88-99, 2017
- 7) 限定圧気工法を併用した DO-Jet 工法の支障物切断性能に関する実験的研究 神山守, 小泉淳, 磯部隆寿, 杉本克美, 志村洋平 第 9 回日中シールド技術交流会論文集 pp.60-65, 2017.8



## 第2章 下水道事業におけるトンネル技術の変遷と課題

### 2-1 はじめに

東京都における下水道の整備は明治 17 年の神田地区において施工された「神田下水」を嚆矢としている。爾来、100 年以上の歳月をかけて平成 6 年度末に東京都区部の下水道の普及は 100% 概成に至った。この結果、東京都区部には 13 か所の水再生センターと 84 か所のポンプ所、約 16,000km に及ぶ下水道管きょが整備された。

この内、下水道管きょの約 50% は高度経済成長期に整備されており、法定耐用年数 50 年を超えた老朽下水道管きょの延長は既に約 1,800 km に達している。今後、高度経済成長期以降に整備した大量の下水道管きょが一斉に耐用年数を迎え、20 年後には約 8,900 km に増加することから、下水道管きょの老朽化対策を計画的に進めることが大きな課題となっている。

下水道管きょは道路を占用して埋設されている。都心部の道路下には、下水道管きょ以外にも、水道や電気、ガス管、通信ケーブル、地下鉄などの多くのライフラインが埋設されている。このため、下水道管きょの老朽化対策を進めるには、埋設物を避けて下水道管きょを布設したり、あるいは移設を最小限に留めるととともに、道路交通や都民の日常生活への影響を最小限に抑えることが必要となっている。さらに、既に整備された下水道管きょは 24 時間 365 日利用されており、下水を一時も止めることはできないため、老朽化した下水道管きょの対策を行うには、下水の流れを切り替える新たな下水道管きょを整備することが必要となっている。

また、これまでの都市化の進展により道路の舗装化や緑地の開発などが進み、下水道に流入する雨水量が、高度経済成長期以前と比較して約 1.6 倍に増加しており、下水道管きょの雨水排除能力が不足してきている。これに加えて、近年では局地的集中豪雨の増加により、雨水整備水準のレベルアップも求められるようになっており、シールド工法が適用となるような大口径の下水道管きょの布設とそれに接続する小・中口径のトンネル工法の需要が高まってきている。

このように、都心部の下水道には、下水道管きょの老朽化対策に加え、雨水排除能力の向上や、耐震性の向上など、様々な機能の向上が必要となっており、東京都下水道局は、普及の概成以降、これらの機能向上を合わせて行う再構築事業を進めているところである。

一方、再構築事業を進める上で、以下のような解決すべき課題も明らかになってきている。道路下には前述した地下埋設物や既設構造物の他に、それらの施設を建設する際に地中に残置された仮設構造物や基礎杭などがあり、これらを適切に撤去や処理をしながら下水道管きょの布設を行う技術が不可欠とな

っている。

本章では、東京都における下水道整備の変遷、我が国のトンネル技術の導入と変遷、トンネル技術の発展に貢献した下水道事業および都市域におけるトンネル技術の課題について述べる。

## 2-2 東京都における下水道整備の変遷

### 2-2-1 草創期の下水道整備<sup>1)2)</sup>

明治 10 年以降繰り返し国民を襲ったコレラの流行により、明治 15 年には、全国で死者が 34,000 人を超えた。特に同年、東京府下では死者が 5,000 人にも達した。

コレラの蔓延を防ぐため、明治 16 年、内務卿山田顕義から上下水道の整備を促す「水道溝渠等改良ノ儀」の示達を受けた東京府は、内務省御用掛石黒五十二に設計を命じ、オランダ人技師ヨハネス・デ・レーテに意見を求め、近代下水道の先駆けとなる「神田下水」の計画を立案した。この下水道計画では、対象地域をコレラで大きな被害を受けた神田地区とし、構造は欧米諸国にならった暗渠、排除方式は合流式（し尿は含まない）で排水は神田川などに放流、本管は煉瓦積みの卵形渠、分管は円形陶管とするものであった。

神田下水の工事は、明治 17 年から同 18 年にかけて 2 期にわたり、約 8 万円を費やし、4km の下水道管きょを建設したが、財政難から国庫補助が不許可となり第 3 期工事は中止を余儀なくされた。以後、上水道整備が先行し、下水道整備は先送りされることとなった。



写真 2-1 130 年以上経過した今も使用している神田下水



なお、当時建設された神田下水のうち、20%にあたる約 800m ほどの下水道管きょが 130 年以上経過した今も現存し、東京都史跡に指定されるとともに、現役として活用されている。

## 2-2-2 東京都区部下水道の 100% 普及への道のり

### 2-2-2-1 下水道計画の策定<sup>1)2)</sup>

近代産業の急速な発展と東京市の人口集中に伴う都市環境の悪化により、明治 33 年に「下水道法」が制定されるとともに、東京市においても下水道整備に向けた測量と調査が再開された。この調査をもとに東京帝国大学中島鋭治博士に委嘱し、明治 41 年に現在の下水道計画の基礎となる「東京市下水道設計」が策定、告示された。

本計画では、降水量が多く、低湿地帯を抱える東京には雨水排除の必要性が高く、緊急を要することや財政状況などから排除方式は合流式が採用された。計画最大雨水量は、1 時間 1.25 インチ（約 30 mm/h、大正 2 年の第 1 期工事着工時に 50 mm/h に変更）とした。また、計画人口は当時の市域最大収容人口の 300 万人、計画排水面積 5,670ha とし、排水区域を 3 つに分け（現在の芝浦、三河島、砂町処理区）、管きょ延長 826km を布設し、放流区域には下水処理施設を整備するものであった。

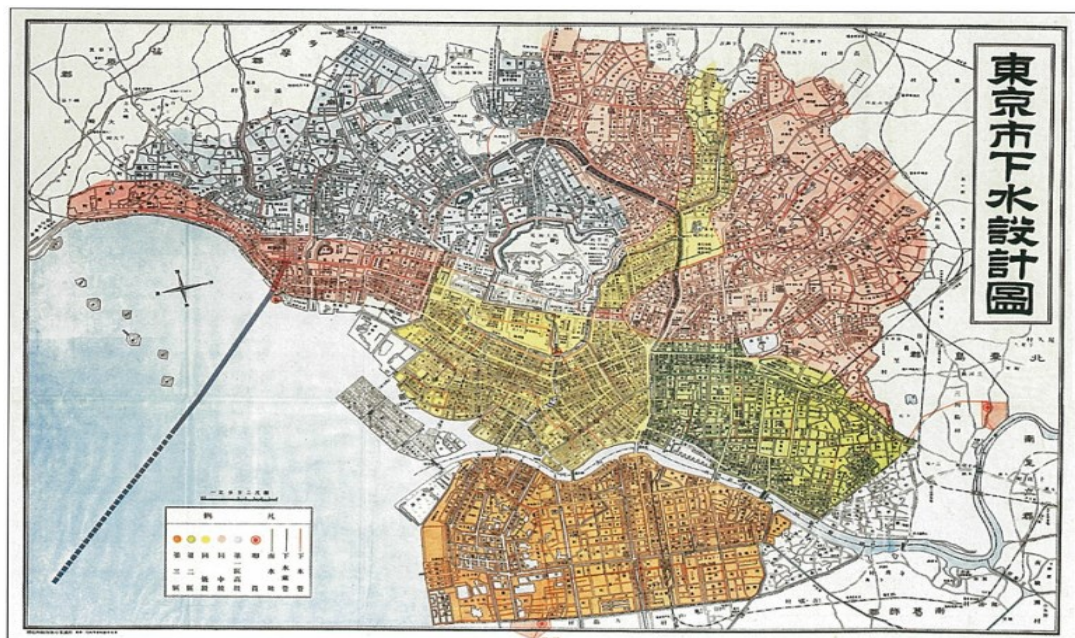


図 2-1 東京市下水道設計（明治 41 年）

昭和 7 年，東京市に 5 郡 82 町村が編入され，行政区は 15 区から 35 区に拡大したが，各町村で進められていた下水道事業もそのまま引き継がれた．これらの各町村の下水道事業では，幹線，ポンプ場，処分場の基幹施設の計画を「東京都市計画郊外下水道設計」として東京府が昭和 5 年に決定していたが，枝線は町村ごとの決定に任されていた．そのため，東京市の下水道計画は，旧市を対象とする「東京市下水道設計」，新市域を対象とする「東京都市計画郊外下水道設計」，「旧 12 町下水道計画」の 3 計画が分立する形となったが，戦時体制のため事業は縮小し，昭和 19 年には打ち切られた．打ち切りまでに約 2,000km の下水道管きょと，約 5 万個の人孔，10 か所のポンプ所，3 か所の処理場の整備が行われた．

#### 2-2-2-2 戦後復興と下水道整備<sup>1)2)</sup>

戦後最初の下水道事業は，昭和 21 年から始まった戦災復興土地区画整理事業に伴う下水道復旧管渠移設事業であり，昭和 32 年まで続けられた．また，3 つに分立していた下水道計画は，新しい下水道基本計画である「東京特別都市計画下水道」(のちに「東京都市計画下水道」と改称)として昭和 25 年に決定，告示された．この基本計画では，計画人口 630 万人，計画対象地域 36,155ha，管きょ計画は 6,468km とし，既設の 3 処理区に加え，小台，落合，森ヶ崎の計 6 排水系統により下水の排除，処理を行うことになった．

その後，昭和 30 年代になり経済復興から東京には 1 千万人を超える昼間人口が活動するようになるが，当時の下水道普及率は 20% にも満たない状況にあり，下水道整備の遅れが深刻な環境上・衛生上の問題をもたらすことになった．また，昭和 34 年にオリンピック東京大会の開催が決定されたこともあり，下水道整備対象区域も荒川以東の地域に拡大され，現在の特別区全域を計画区域として下水道整備は一層進められた．

昭和 40 年代には，高度経済成長のひずみとして生じた水質汚濁に代表される公害が大きな社会的問題となり，昭和 45 年のいわゆる「公害国会」において，水質汚濁防止法などの制定と下水道法などの改正が行われた．下水道法の改正により，同法の目的に「公共用水域の水質保全に資すること」が加えられ，水質保全対策として下水道整備の位置づけが明確にされた．

このように，時々の社会経済状況に対応し，幾多の計画変更を重ねながら，平成 6 年度末に東京都区部の下水道整備 100% 普及概成が達成された．

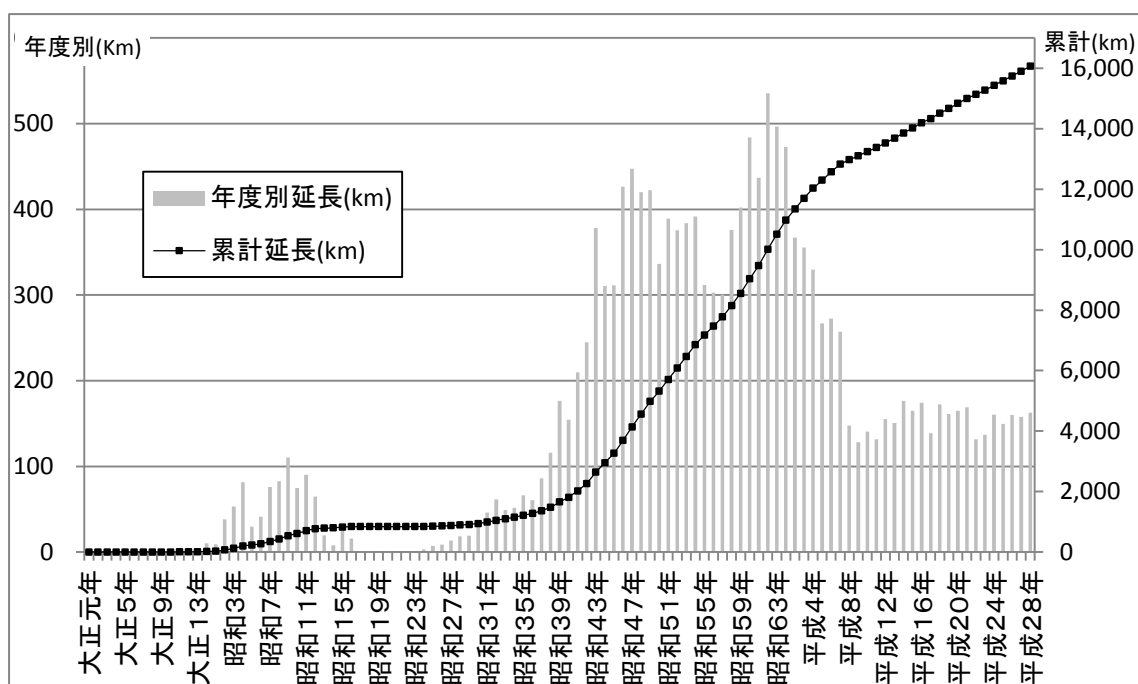


図 2-2 東京都（区部）の年度別下水道管きょの布設延長の推移

### 2-2-2-3 下水道の老朽化対策および機能向上を図る再構築事業<sup>3) 4) 5)</sup>

100%普及概成は達成したものの、初期に整備した下水道施設が法定耐用年数を超え、管きょの損傷等により道路陥没が増加するなど老朽化の課題が顕在化してきていた。さらには、頻発する浸水被害への対応や公共用水域の水質改善など、下水道システムをさらに充実させることが求められていた。

下水道局では、こうした課題への対応を見据え、普及の概成以降の下水道のあり方を示した「第二世代下水道マスタープラン」を普及概成前の平成4年に策定した。このプランでは、老朽化への対応に加え、雨水排除能力の増強や水質改善等の下水道機能の向上を図る「再構築」事業を打ち出している。

このプランの方針の下、下水道管きょの再構築に当たっては、老朽箇所の部分的な対応を図るのではなく、処理区全体の下水道管きょの機能改善、増強を進めることとしている。

区部全域の膨大な下水道管きょを対象にすることから、アセットマネジメント手法を活用し、下水道管きょのライフサイクルコストを考慮した経済的耐用年数の設定（図 2-3）や、区部を整備年代により三期に分けて事業を段階的に進めることで（図 2-4）、中長期的な事業量の平準化を図る等、計画的かつ効率的に再構築事業を実施してきている。この事業計画に基づく管きょの面的な再構築工事（面整備）では、管路内テレビカメラ等による調査結果を基に老朽化等による損傷の

評価を行うとともに、雨水排除能力の検証を行い、既設の下水道管きょを有効活用するか、更生工法を採用するか、または下水道管きょを布設替えするかを判定している。

こうした下水道管きょの再構築に加え、雨水排除能力の抜本的な向上のため、新たな下水道幹線等の整備も合わせて進めている。さらに、良好な水環境の創出に向け、合流式下水道の改善対策として、雨天時の下水をより多く水再生センターに送水する下水道管きょや降雨初期の特に汚れた下水を貯留する貯留管の整備等にも取り組んでいる。

これらの事業を着実に推進し下水道システムの機能向上を図ってきた結果、普及概成した平成6年度末の管きょ延長14,603kmに比べ、平成28年度末時点の管きょ延長は1,457km増の16,060kmにも達している。

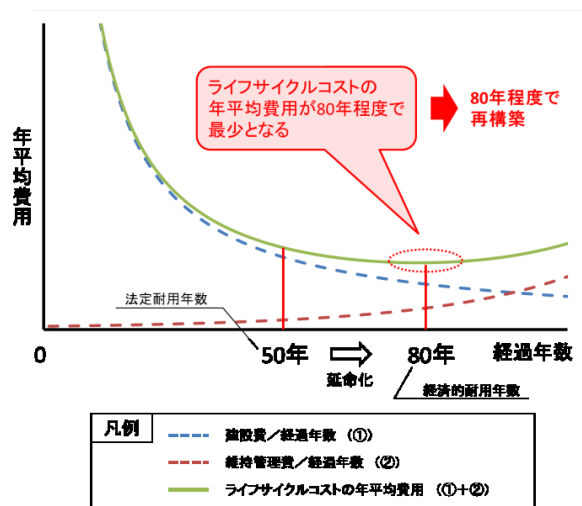


図 2-3 東京都区部の下水道管きょの経済的耐用年数

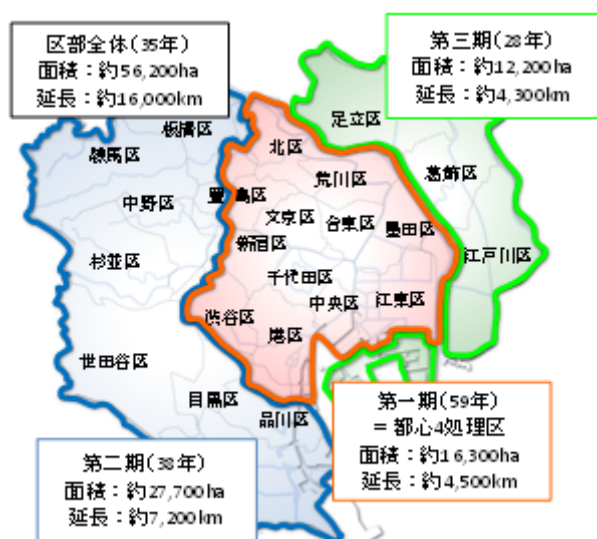


図 2-4 東京都区部における再構築事業の対象範囲  
(現在第一期の範囲を対象に事業を推進)

## 2-3 我が国のトンネル技術の導入と変遷<sup>2) 6) 7)</sup>

### 2-3-1 日本で最初のトンネル

日本のトンネル工事は青の洞門や箱根用水トンネルなどのように独自の技術を駆使して建設されてきたものもあるが、西洋の近代技術が導入されて最初に行われた工事は、石屋川トンネルといわれている。以来、わが国では鉄道、水路、道路用等の多くのトンネルが建設されてきた。当初は矢板工法が主流であったが、補助工法があまり存在しなかったこともあり、経験、勘、コツといった職人芸が必要で、トンネル工事の成否は、工夫の技量に左右されていた。その後、NATM 工法、シールド工法などの技術導入、技術開発により職人芸的な技術から、計測データに基づく工法や汎用的な機械によりトンネルが建設されるようになった。

### 2-3-2 シールド工法の導入

シールド工法は、フランス人技術者ブルネルにより、1818 年にフナクイムシが体の先端にある硬い貝殻で木材に穴を空けながら木材を食べると同時に、石灰質の分泌液を口から出して穴の内側を固めつつ掘り進んでいくことにヒントを得て考案され、特許が取得されたものである。ブルネルの特許から 200 年近くが経過しているが、基本的なコンセプトは現在のシールド工法も変わっていない。



図 2-5 シールド工法のヒント  
になったフナクイムシ

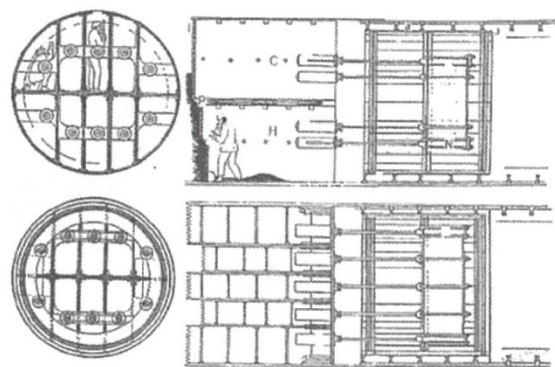


図 2-6 ブルネルのシールド特許図面

最初のシールド工法によるトンネル工事は、テムズ河床横断トンネルで、1825 年に掘削が開始された。一方、日本で最初にシールド工法が採用された

のは、1917 年に羽越線折渡トンネル工事で、切羽の安定が保てない区間の特殊工法として導入された。

その後、1960 年に名古屋市営地下鉄覚子山トンネル工事において円形断面の都市トンネルとして採用されて以降、大都市のほとんどが軟弱な沖積地盤上にあり地下水位が高いこと、都市化の進展に伴って社会基盤の整備が急務となっていたこと、都市の過密化に伴い地下埋設物の輻輳から開削工法によるトンネル布設が困難となったことなどを背景に、技術開発が積極的に進められ、日本独自でシールド工法が大きく発展することとなった。

### 2-3-3 東京都におけるシールド工法導入の経緯

東京都下水道局で初めてシールド工法を採用したのは、1962 年 4 月に着工した石神井川下幹線その 9 工事である。写真 2-2 は、石神井川下幹線その 9 工事に使用したシールド機である。当然のことながら我が国下水道界においても初めての工事となった。

一方、前述した 1917 年に行われた羽越線折渡トンネル工事はシールド工法が採用はされたものの途中で切羽崩壊などのため中止を余儀なくされており、わが国でシールド工法が本格的に成功したのは、1936 年の鉄道省の関門トンネル下り線部と海底部工事である。圧気併用の開放型円形シールド外径  $\phi 7000\text{mm}$  である。その後、都市トンネルに採用されたのが、1957 年の東京地下鉄第 4 号線（現東京メトロ丸ノ内線）永田町において比較的安定した地盤に適用した半円形ルーフシールドである。

このようにシールド工法の採用事例が少ない中、東京都下水道局内では特に小断面（ $\phi 2500\text{ mm}$ ）で地下水がある地盤と街中でのシールド工法の適用に向けた検討が行われた。当時の下水道局は、オリンピックを間近に控え急ピッチで下水道の整備を進めており、下水道工事による交通障害や工事沿道商工業者の受ける営業上の損害、工事による地盤沈下と建物の被害など、解決すべき多くの課題を抱えていた。すなわち、住民からは下水道整備促進を求められる一方で、地元や交通関係者、道路関係者からは迷惑がられたりもしていたのである。そのため、もっぱら開削工法によっていた下水道管きょ建設工事を非開削のトンネル工法で工事を進めるなど、工事を近代化、機械化していかなければということが課題となっていた。

こうしたことを踏まえ、当時の下水道局の建設部長であった野中八郎氏は後日、「日本で初めて、しかも公共的な下水道管きょ工事に率先採用するには大英断を要した」と述べているように、シールド工法を下水道工事で採用するには技術面、費用面において多くの課題を克服しなければならなかった。技術面については、シールド工法の先駆者である熊谷組の加納専務、熊谷勝正支店長



の献身的な研究努力によるところが大であったと述べている。加納専務とは、鉄道省の技師で下関工事事務所の工事課長として関門トンネルのシールド工事に従事した加納俊二氏である。この功により 1942 年に鉄道大臣表彰を受け、戦後の 1949 年に熊谷組に取締役技術部長として迎えられた。加納氏と野中氏が大学の同窓であるといった縁より、シールド工法を下水道工事に適用することについて、両氏の間で情報交換や技術的な検討が行われ実現に至ったと考えられる。また、当時、ソ連などで小口径のシールド機械が開発されコスト面でも導入する意義が高まってきたようである。

石神井川下幹線その 9 工事に従事した設計・工事担当者によれば、シールド工法採用の狙いの一つである地盤沈下の抑制効果について、「開削箇所である特殊人孔付近では 18 mm、その他は±5 mm程度であったが、シールド施工部は変化が見られなかった」とその効果を評価している。また、今後シールド工法の採用拡大を図っていくための課題として、工事費の約 1/3 を占める一次覆工のコストダウンが不可欠であると論じている。

このような経緯のもとシールド工法は、下水道整備に欠かせない工法として以降積極的に採用され、わが国固有の土木技術として海外に技術輸出されるようになった。その幾分かは東京都下水道局の工法導入やその後の新技術の開発や採用などが貢献してきたと考えられる。

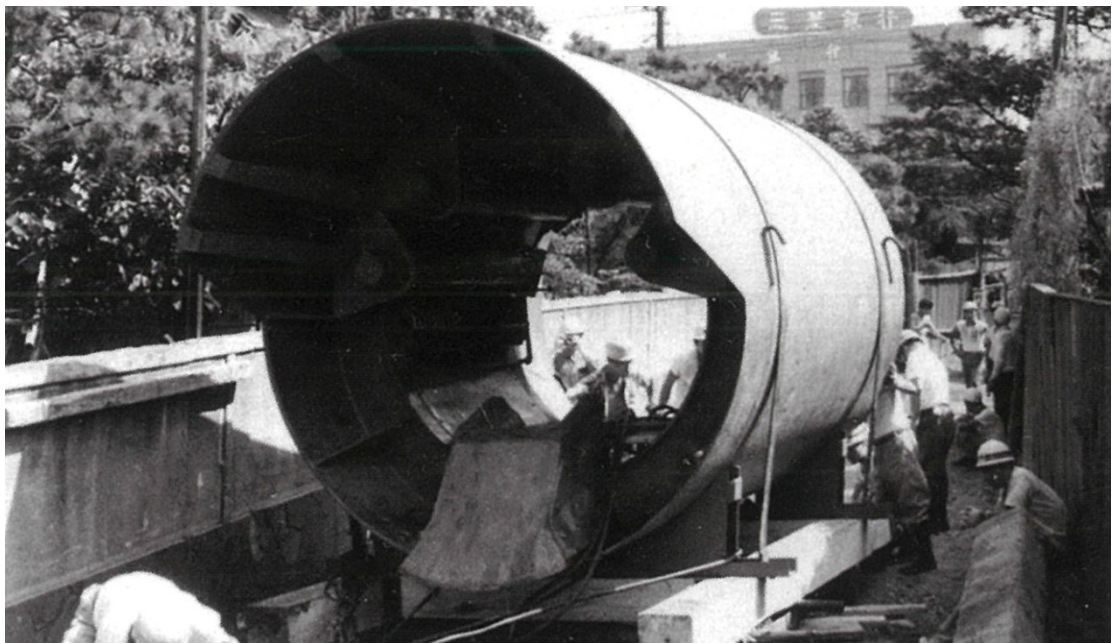


写真 2-2 石神井川下幹線その 9 工事に使用したシールド機

## 2-3-4 シールド技術の変遷

### 2-3-4-1 開放型シールド

初期のシールド工法は、圧気工法を併用した手掘り式が主流であり、軟弱地盤や地下水位が高い条件では、薬液注入や地下水位低下工法などを補助工法として用いることが一般的であった。先に述べた石神井川下幹線工事も圧気工法を併用した手掘りシールドである。

手掘りシールドと併せて機械掘り式なども実用化されたが、1970年代以降の密閉型シールドの導入により1990年以降はほとんど見られなくなった。

### 2-3-4-2 密閉型シールド

シールド工法は、その導入以来、都市部におけるトンネル施工法として急速に採用が拡大されてきた。しかし、開放型シールドは都市部における軟弱で地下水位が高い地盤においては、切羽の安定を図るために圧気工法や地盤改良を用いることになる。このため、工事費の増高や広域的な地盤沈下の発生、井戸枯れなどの問題が発生してきた。この問題に対応すべく、1960年代後半から急速に密閉型シールド工法の開発、実用化が進められた。

密閉型シールド工法は、切羽の直後に隔壁を設けて切羽と坑内を遮断し、隔壁により切羽側のチャンバ内だけで切羽の安定を確保し、坑内側は大気圧状態とする工法で、開放型と比較して作業の安全性や能率が向上するとともに、地盤変位抑制が可能になった。密閉型には泥水式シールドと土圧式シールドがある。

泥水式シールドは圧気の代わりにカッターチャンバ内に泥水を充満、加圧するもので、1964年に開発されたのち、1968年より実用化され、営団地下鉄9号線(現東京メトロ千代田線)第1期神田川シールド工事において導入された。下水道工事においては、1969年、東京都下水道局の乞田幹線工事において初めて導入された。

最近では1台のシールド機で9kmもの長距離の掘進が可能となるなど、高水圧下での長距離、高速施工に対応する様々な技術が開発されている。

土圧式シールドは日本で発明、開発されたもので、掘削土砂を塑性流動化してチャンバに充満させ、所定の圧力を加えて切羽の土水圧に対抗して切羽の安定を図るもので、シールド工法の主流となっている。この工法は、土圧シールドと泥土圧シールドに大別される。

土圧シールドは、1975年に東京都水道局水元配水管工事で初めて導入された。泥土圧シールドは、泥水式シールドや土圧式シールドの課題であった細粒



分の少ない崩壊性の砂，レキ層の切羽安定と掘削土のスムーズな取り込み，排出を目的に開発され，1976年に東京都下水道局において直径2.44mの泥土圧シールドがはじめて採用された。

その後，土圧式シールドは地盤条件や施工条件に応じて各種のシールドが開発されてきたが，その適用性の広さと切羽の安定性，経済性などから国内外で泥土加圧シールドが多く採用されるようになっている。

2017年2月には東京外かく環状道路本線トンネル（関越～東名間）において，シールド外径16.1mの大断面トンネルの掘削が開始された。

図2-7に，1964年より現在に至るまでのシールド形式の変遷を示した。

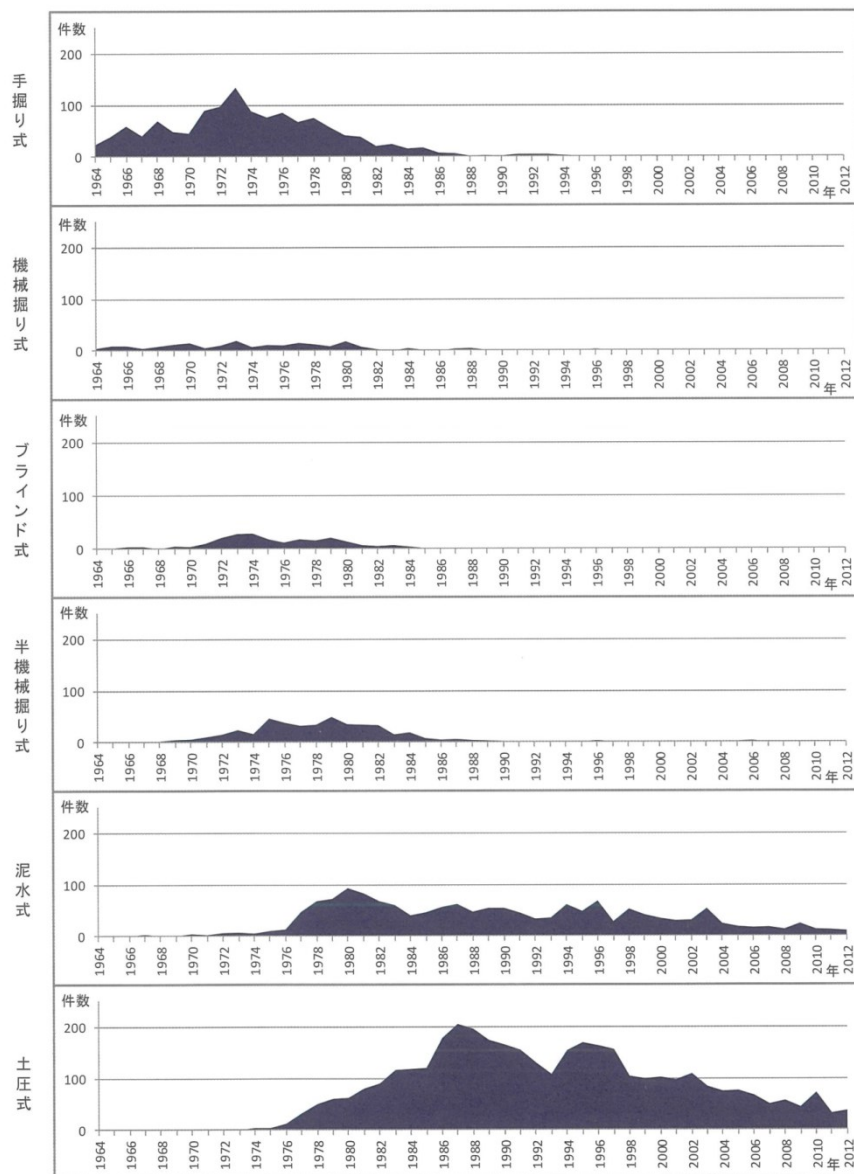


図 2-7 シールド形式の変遷

### 2-3-5 特殊条件下における施工技術の変遷

大都市における下水道をはじめとしたトンネルは、大断面から小断面まで幅広いニーズがある一方で、道路線形や既設の埋設物に制約を受けることが多く、かつ発進到達立坑用地等の確保が困難なことも多い。このため、特殊条件下における施工技術の開発が行われてきた。

#### 2-3-5-1 急曲線施工

道路や鉄道では、走行の安全性の観点などから省令等で最小曲線半径が規定されており、曲線半径が100mを下回るものは少ない。一方、下水道においては、公道下に埋設することを基本としており、道路線形や既設の埋設物との取合などの関係から100m以下の急曲線施工が多くみられる。

図2-8は、曲線半径の年代別推移である。2000年以降、曲線半径30m未満の工事が3割以上に増加している。

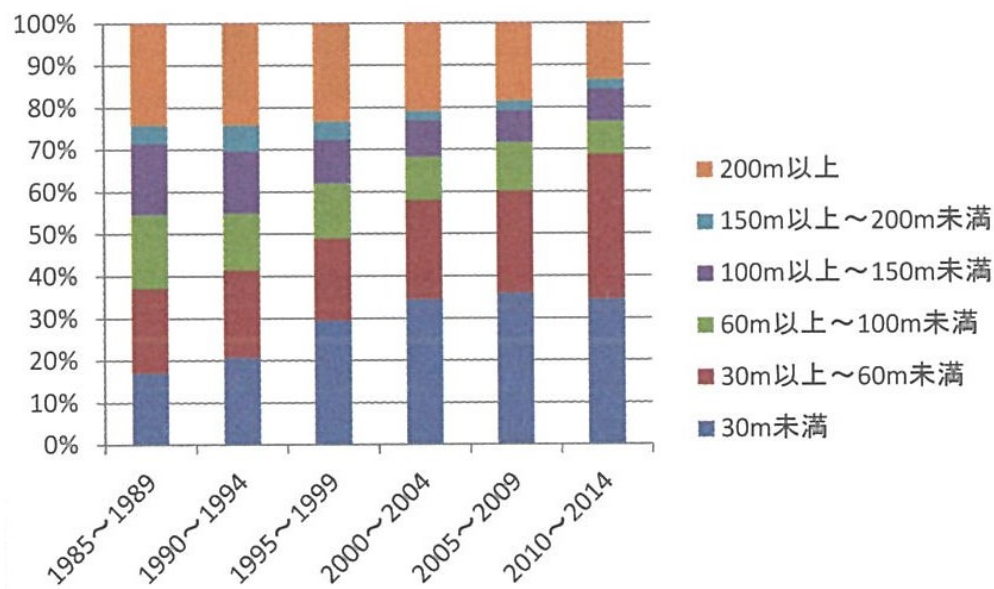


図2-8 シールド工法の曲線半径の年代別推移

表2-1は、全国の下水道事業における急曲線工事の中から曲線半径30m以下の工事を抽出したものである。最小半径は、東京都下水道局馬込幹線工事の8mとなっている。

急曲線施工が増加した背景は、埋設物が輻輳し、幹線道路から離れた道路での管きょ布設を余儀なくされ、道路線形や交差点部分などで急曲線施工が必要となるケースの増加にあわせ、シールドの中折れ装置や裏込注入と袋付セグメントなどの余掘り充填の技術が一般化し、地盤改良を施工せずとも急曲線施工

が可能となったことが考えられる。

表 2-1 全国の下水道事業における急曲線工事（曲線半径 30m 以内）  
（2014 年現在）

No.	最小曲線 半径 R(m)	外径 D(m)	R/D	工 事 名 称	全体工期	シールド 形式	発注者
1	8	5.24	1.5	馬込幹線工事	2000.03～ 2003.03	泥土圧	東京都 下水道局
2	10	6.15	1.6	第二地蔵堀幹線その1工事	1988.03～ 1990.02	泥土圧	東京都 下水道局
3	10	5.25	1.9	南部処理区岡村第 2 幹線下水道整備 工事	1989.01～ 1995.03	泥 水	東京都 下水道局
4	10	4.94	2.0	神谷幹線その 2, その 2-2 工事	1996.01～ 1999.03	泥土圧	東京都 下水道局
5	10	4.45	2.2	飛鳥山幹線(その 2, その 3)工事, 第二 岩淵幹線(その 2)工事	1998.01～ 2001.09	泥 水	東京都 下水道局
6	10	4.20	2.4	豊島区南長崎一丁目, 西池袋五丁目 付近枝線工事, その 1-2 工事	2003.01～ 2006.01	泥 水	東京都 下水道局
7	10	3.93	2.5	南部処理区大岡川右岸雨水幹線下水 道整備工事	2009.02～ 2011.03	泥土圧	横浜市 下水道局
8	15	5.85	2.6	茅場町幹線及び第二低段幹線その 2 工事	1993.07～ 1995.03	泥土圧	東京都 下水道局
9	12	4.45	2.7	平成 5 年度公共下水道第 4 工区管渠 築造工事	1993.06～ 1996.09	泥土圧	東大阪市
10	17	6.25	2.7	茅場町幹線・第 2 低段幹線	1990.01～ 1994.01	泥土圧	東京都 下水道局
11	10	3.50	2.9	福泉雨水幹線下水管布設工事	2001.01～ 2003.03	泥土圧	堺市 水道部
12	10	3.50	2.9	港北白金台 4 丁目, 白金 2 丁目付近再 構築工事	2001.01～ 2004.03	泥土圧	東京都 下水道局
13	12	4.19	2.9	目黒川右岸排水施設整備工事その 3(下流工区シールド工)	2002.01～ 2004.02	泥土圧	品川区
14	10	3.49	2.9	神奈川県処理区白幡第 2 幹線下水道 整備工事	2002.01～ 2006.03	泥 水	横浜市 下水道局
15	10	3.49	2.9	平成 7 年度飛行場北排水区第 22 工区 下水道工事	1995.09～ 1997.03	泥土圧	八尾市 下水道部
16	10	3.49	2.9	山崎川右岸雨水幹線下水道築造工事	1999.01～ 2002.03	泥土圧	名古屋市 上下水道局
17	15	5.23	2.9	東山雨水調節池築造工事	1991.07～ 1993.03	土 圧	名古屋市 上下水道局
18	30	10.30	2.9	東京都勝島ポンプ所流入管渠工事	2008.03～ 2010.09	泥 水	東京都 下水道局
19	13	4.44	2.9	東郊通幹線下水道築造工事	1994.08～ 1996.03	泥土圧	名古屋市 上下水道局
20	19	6.45	2.9	両国幹線その 1, その 1-2 工事	1990.06～ 1992.03	泥土圧	東京都 下水道局

## 2-3-5-2 大断面施工

日本下水道協会のシールド工事用標準セグメントは、外径 6000 mm までを標準化している。この規格に沿って下水道シールドを分類すると、大断面はセグメント外径 6m 超となる。

図 2-9 に示すとおり、外径 6m 以上の大断面は 1 割程度ではあるものの、年代ごとに一定量の施工実績がある。先に述べたとおり、最近では東京外かく環

状道路本線トンネル工事において、シールド外径 16.1m での施工が開始されている。

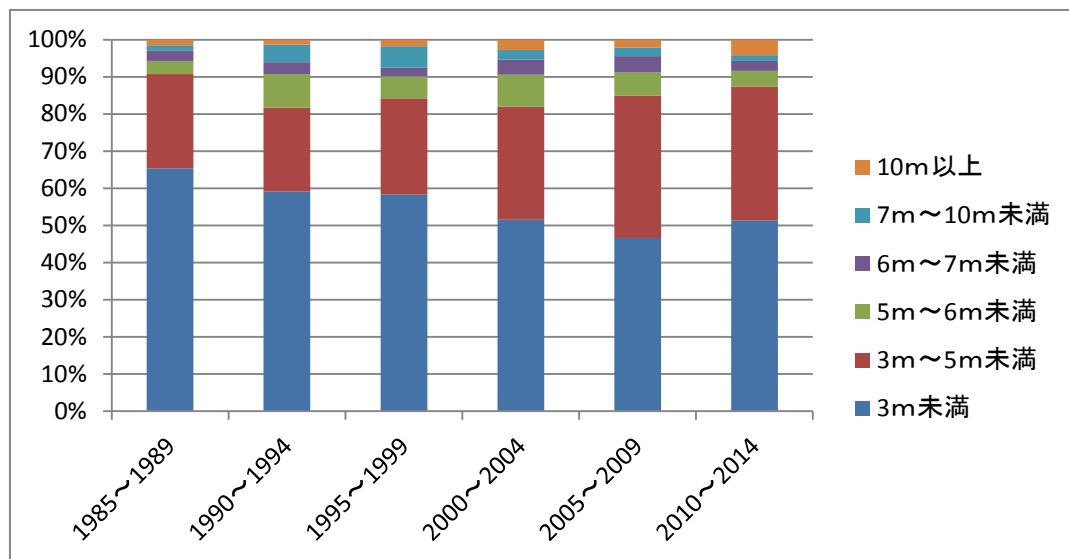


図 2-9 シールド外径毎の割合の年代別推移

### 2-3-5-3 長距離施工

密集した市街地では、作業基地も含めた発進到達立坑用地の確保が極めて困難であり、長距離掘進を行ってトンネルを築造する必要性が高まっている。図 2-10 に示すとおり、平均施工延長は年々増加している。近年では、東京外かく環状道路本線トンネルの 9.2 km、東京都下水道局千代田幹線の 8.7 km などがある。

これらの長距離施工が可能になってきたのは、特殊技術として、カッタービットの交換、カッタービットの耐久性向上、搬送設備、測量技術の向上などが挙げられる。

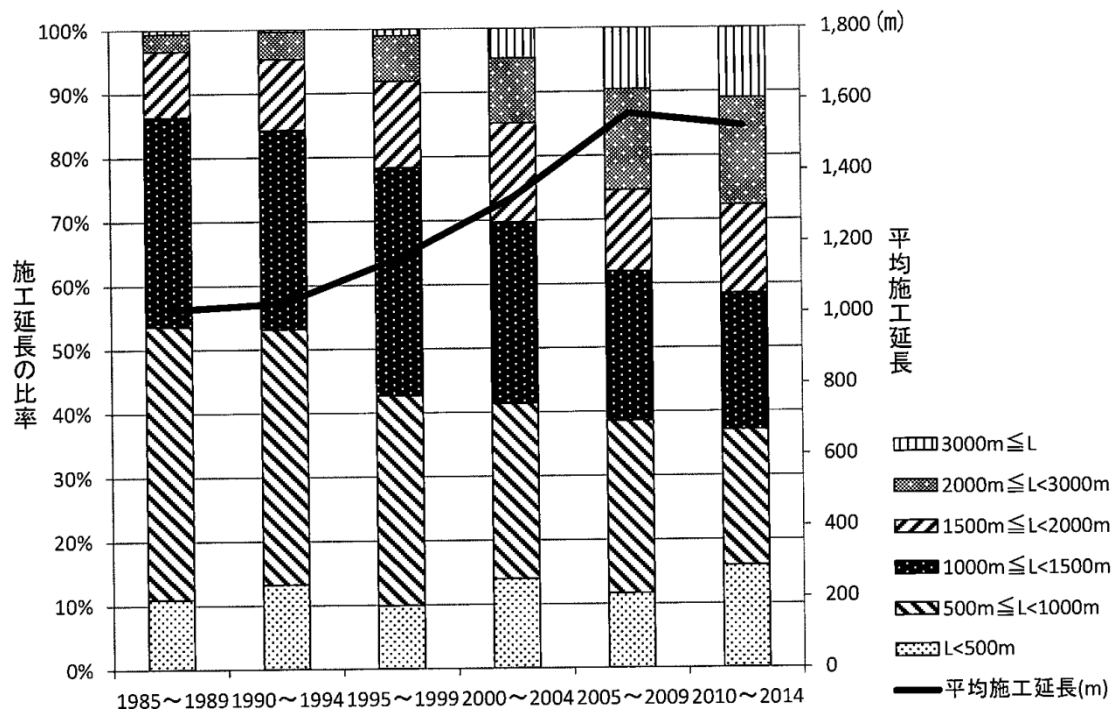


図 2-10 シールドの平均施工延長の年代別推移

### 2-3-6 都市の課題に挑戦するべく多様化するシールド技術

これまでに挙げたシールド技術のほか、制約条件の多い中で必要な断面や線形を確保すべく、複円形断面シールド、地中接合、地中分岐シールドなどが開発、採用されてきている。

都市部でのトンネル築造は、様々な既設構造物を避けなければならない、特に、既設構造物を建設する際に設置された仮設構造物や基礎杭などの支障物への対応が重要な課題となる。

これらについて、超高圧ジェット噴流を活用した技術により、既設構造物や周辺地盤に影響を与えることなく必要部分を撤去してトンネルを築造することができる支障物撤去技術は、都市域におけるトンネル築造の課題解決に大きく貢献するものである。

## 2-4 トンネル技術の発展に貢献した下水道事業<sup>1)7)</sup>

### 2-4-1 下水道普及までの施工技術

下水道管きょの施工は、戦前から戦後にかけては人力かつ古来の器具を用いての施工が主であったが、昭和 30 年代半ばころから、木製の仮設材が鋼製に

変わったほか、経済発展と公共事業の拡大に伴い工事の大型化や迅速化が求められ、土工や杭打ちなどの機械化が進むなど、施工法が急激に変化していった。

また、下水道管きよの整備対象が軟弱地盤へ広がり、かつ、埋設深が大きくなってきたこと、工事に対する住民の注目や環境意識が高まったこと等により、工事の安全性や経済性、効率性に留まらず、騒音や振動など環境に配慮した施工技術が求められ、技術開発が進んだ。

施工法で見ると、戦前は一部に隧道工法が採用されていたが開削工法が多く、戦後は、開削工法に加えトンネル工法としてシールド工法や推進工法が用いられるようになった。

下水道整備最盛期の昭和 45 年から東京都区部の下水道の普及が概成した平成 6 年度までの工事に対する工法別の比率は、開削工法が 87%、シールド工法が 5%、推進工法が 5%であった。

開削工法による布設が標準であった下水道管きよであるが、普及を進めるにあたり、埋設物が輻輳している箇所や開削工法による施工が困難な場所においても下水道管きよを布設する必要性が生じたことと、さらに環境への配慮など現場ニーズに対応するため、非開削工法である推進工法やシールド工法が開発、実用化されていった。

## 2-4-2 推進工法

推進工法は、昭和 28 年、台東区石浜町において通信ケーブルの下を口径 1200 mm で延長 14.6m を施工したのが最初である。

当初は開放型シールドと同様に切羽全面の推進管に刃口を装着した簡易な施工技術であったが、昭和 40 年代以後、施工環境が厳しくなっていくとともに急速に採用が拡大されるのにあわせ、シールド工法との融合化や施工の長距離化、高速化、曲線施工、小口径化などに向けた開発が積極的に行われた。

たとえば、泥水加圧方式（1965 年）、引張式（1969 年）、部分圧気式（1971 年）に加え、1982 年には矩形渠セミシールドなどが導入されていった。近年では、軟弱地盤などにおいて切羽の安定保持とずり処理の効率化を図った泥濃式推進工法（1982 年）が多用されるようになった。

さらに、初期の推進工法は元押し式であったが、長距離施工を可能とすべく、推進中の管体の中間に中押しジャッキを設ける中押し工法が開発（1972 年）、採用されたほか、埋設物が輻輳している場合や、道路交通への影響を最小限とするといったニーズに応えるため、推進工法の適用拡大を目指し、人が入れない小口径の下水道管きよ（口径 700mm 未満）にも適用できる小口径推進工法が多種開発された（1975 年）。

推進工法は、現場のニーズに合った技術開発が積極的に行われ、採用が拡大

された結果、現在では一般的な下水道管きょの布設工法となっている。

### 2-4-3 シールド工法

下水道整備においては、特に都市部においてシールド工法により下水道管きょが多く布設されてきた。これは、日本の大都市の多くが大河川の河口部に形成されていたこともあり、三角州など軟弱な地盤に位置していることに起因する。東京都下水道局を例にとると、江戸川や多摩川により形成された地下水位が高い軟弱な沖積層が広く分布しているため、東京都区部の下水道管きょの全延長約 16,000km のうち約 950km がシールド工法により布設された。

このような背景により、全国のシールド工事のうち約 6 割が下水道事業において採用されており、他インフラと比較して圧倒的に多い。このため、セグメントの標準化をはじめ、多くのシールド掘進技術や覆工技術の開発や実用化にも積極的に参画、寄与してきた。

先に述べたとおり、下水道工事に初めてシールド工法を採用したのは、1962 年、東京都下水道局の石神井川下幹線工事である。これは、東京都下水道局のシールド工事第 1 号であるだけでなく、日本の都市トンネルにおける小断面シールドの第 1 号でもあった。本工事は、1957 年の営団地下鉄 4 号線永田町工区におけるルーフシールド、1960 年名古屋市地下鉄覚王山トンネルにおいて円形断面シールドがはじめて施工されるというシールド工法黎明期に、国内外の技術情報を広く収集するなど課題を克服して進めた工事である。

当時の担当者の記録では、地盤沈下の発生とともに地下水の流入と切羽の崩壊、蛇行といったことに注意が注がれていた。さらに施工後の考察として、今後の下水道整備促進の有力な工法となることと、そのための課題として適用地盤や埋設深度の確認、コストの低減などを挙げていた。

その後、特に東京都では、普及事業のみならず雨水流出量の増大に伴う雨水対策や合流式下水道の改善対策、老朽化対策である再構築事業が積極的に推進されたことから、大口径の下水道管きょの布設とそれに接続する小・中口径の下水道管きょの整備が必要となった。こうした事業は、多くのインフラが整備されている中での工事となるため、地下構造物を避けて布設せざるを得ず、必然的に下水道管きょの埋設位置が大深度化したこともシールド工法の採用拡大に拍車をかけた。

当初のシールドは、開放型手掘り式、機械掘り式が主で、圧気、地盤改良を併用して施工され、昭和 50 年代までシールド工法の中では主力の工法であったが、軟弱な沖積地盤でのシールド掘削に伴う地盤沈下の発生と、それに伴う周辺家屋への影響を極力低減するために技術開発が進められた。

下水道工事では 1969 年には泥水式、1974 年には土圧式、1976 年には泥土圧



式が採用され、昭和 50 年代半ば以降急激に開放型が減少し、泥水、土圧、泥土圧式に移行していった。

表 2-2 は、シールド掘進技術の開発とその実用化、採用状況を端的に示すため、初期の 1962 年から 2006 年までに東京都下水道局が施工したシールド工事を、施工延長、仕上がり内径、シールド機械タイプ別に整理したものである。

表 2-2 東京都下水道局におけるシールド工事の工法別施工実績

起 工 年 度	起工延長 (m)			シールド仕上り内径 (mm)		シールド機械タイプ (件)							
	一 次	二 次	一 省 略 ・ 二 次 覆 工 体 型	最 小	最 大	手 掘 り	シ ャ ベ ル 併 用	ブ ラ イ ン ド	機 械	泥 水	土 圧	泥 土 圧	そ の 他
S37	1,948	1,948	0	1,800	3,700	2	0	0	0	0	0	0	0
S38	2,722	2,722	0	1,650	2,800	5	0	0	0	0	0	0	0
S39	1,128	1,128	0	2,500	5,000	3	0	0	0	0	0	0	0
S40	6,634	6,634	0	1,500	5,000	8	0	1	3	0	0	0	0
S41	3,831	3,831	0	1,650	3,000	7	0	0	0	0	0	0	0
S42	12,046	12,046	0	1,500	4,000	14	0	0	2	0	0	0	0
S43	8,743	8,743	0	1,500	4,000	11	0	1	3	0	0	0	0
S44	18,880	18,184	0	1,650	3,700	32	0	1	1	1	0	0	0
S45	15,950	18,609	0	1,500	3,700	31	0	1	1	0	0	0	0
S46	45,892	44,318	0	1,400	4,800	45	0	7	1	1	0	0	0
S47	47,454	42,239	0	1,400	7,000	38	4	8	3	0	0	0	0
S48	17,437	20,041	0	1,350	6,500	15	1	5	1	1	0	0	0
S49	17,686	21,298	0	1,650	6,500	17	5	2	1	1	1	0	0
S50	12,320	13,984	0	1,500	4,500	10	4	1	3	1	1	0	0
S51	30,699	37,699	0	1,500	7,000	13	3	5	1	1	3	1	0
S52	22,327	15,803	0	1,500	4,500	6	3	6	2	1	1	0	0
S53	34,694	22,230	0	1,500	5,750	11	4	8	8	1	8	0	0
S54	41,983	35,408	0	1,500	7,000	11	0	8	5	6	3	2	0
S55	36,609	23,035	0	1,200	6,500	10	5	4	0	11	4	3	0
S56	41,283	20,721	0	1,200	6,500	8	3	9	2	8	16	0	0
S57	46,350	41,772	0	2,150	7,550	6	0	11	1	7	13	5	0
S58	28,175	40,064	0	1,500	6,750	9	4	4	2	8	2	5	0
S59	18,860	22,219	0	1,500	8,000	1	4	2	0	4	1	8	0
S60	19,945	30,269	0	1,500	8,000	0	2	1	0	4	1	17	0
S61	21,114	20,322	0	1,500	7,400	1	2	3	0	2	16	3	0
S62	16,122	12,850	0	1,500	6,500	0	2	2	0	1	9	6	0
S63	23,376	13,736	0	1,350	6,250	0	4	0	0	1	4	12	0
H1	24,584	22,642	0	1,350	6,500	0	5	0	0	4	2	17	0
H2	23,798	5,716	0	1,000	6,500	0	0	0	0	11	4	6	0
H3	19,124	8,409	0	1,500	6,750	0	0	0	0	4	2	15	0
H4	20,570	7,383	0	1,500	6,750	0	0	0	0	8	2	13	0
H5	14,281	19,786	0	1,000	6,750	0	0	0	0	10	1	10	0
H6	8,744	10,355	0	1,500	6,600	0	0	0	0	8	0	10	0
H7	22,770	19,555	0	1,650	6,500	0	0	0	0	14	1	13	0
H8	15,977	10,043	0	1,650	8,000	0	0	0	0	8	2	16	0
H9	12,864	23,243	0	1,650	6,500	0	0	0	1	9	2	21	0
H10	15,187	14,730	0	1,650	8,500	0	0	0	0	4	0	19	0
H11	8,195	10,508	1,899	1,500	8,500	0	0	0	0	7	0	14	0
H12	16,078	10,326	2,372	1,500	4,750	0	0	0	0	9	0	13	0
H13	15,428	11,762	4,120	1,100	4,650	0	0	0	0	6	0	22	0
H14	6,934	8,206	1,792	1,200	8,500	0	0	0	0	7	0	19	0
H15	7,398	12,634	6,808	1,650	7,600	0	0	0	0	5	0	18	0
H16	5,354	3,955	2,808	1,350	5,000	0	0	0	0	3	0	11	0
H17	3,219	4,809	2,515	1,000	8,500	0	0	0	0	1	0	17	1
H18	2,881	4,303	4,088	1,650	5,000	0	0	0	0	1	0	16	0



この他、下水道事業がシールド工法の発展に貢献してきた技術を以下に紹介する。

#### 2-4-3-1 覆工の標準化

下水道整備が国の重要政策として推進されたことから、全国各地で下水道工事が進められるようになった。これに伴い、1960年代から70年代にかけて下水道事業におけるシールド工事の事業量が増加したため、セグメントの規格化、標準化が進められ、1973年には日本下水道協会と土木学会との共編によるシールド工事用標準セグメントとして標準化が行われた。

#### 2-4-3-2 急曲線対策

1969年着工の東京都下水道局多摩川流域下水道野川幹線工事において、直線部をコンクリートセグメント、 $R=20\text{m}$ の曲線部にテーパのついた鋼製セグメントを使用したのを皮切りに、急曲線施工が増加した。

その後、東京都下水道局糞谷東幹線工事では、セグメント幅の減少、テーパセグメントの採用、外径調整セグメントの使用、偏荷重に対するセグメント補強、袋詰めセグメントなどの工夫、技術開発が行われ、急曲線施工において現在でも有効となる対策を実施している。

また、1976年東京都下水道局井の頭幹線工事において、シールド機に下水道初の中折れ装置が採用され、コピーカッターの余掘り範囲の大幅な減少が図られた。

下水道管きょは、道路下に布設場所を求めることが原則であることから、シールド工法を採用するような比較的大きな断面であっても、道路線形や交差点形状に合わせた線形とせざるを得ないケースに多く直面する。従って、急曲線施工は下水道事業のニーズから技術開発が行われたといっても過言ではない。

#### 2-4-3-3 二次覆工の省略

汚水が流下するなど、腐食性環境下の下水道管きょでは、二次覆工の施工は蛇行修正とともに必要な措置であった。しかしながら、シールド掘進技術の進歩に伴う施工精度が高まるなかで、東京都下水道局は、コスト縮減と工期短縮などを図るため従来の二次覆工が持っている防食機能を防食層としてセグメントに持たせるための研究を進め、二次覆工一体型セグメントの実用化を下水道事業で初めて行った。その後、実績を積み重ねるなか、2002年には「二次覆工一体型セグメント設計・施工指針案（現下水道シールド工事用二次覆工一

体型セグメント設計・施工指針）を整備して、これまでに複数の下水道工事で採用してきている。

#### 2-4-3-4 多種多様な工法の採用

以上述べた他にも、大都市において下水道管きょを整備していくためには、様々な既設地下構造物を避けなければならない、限られたスペースでの施工を余儀なくされる。このため、必要な流下断面を確保するため、東京都下水道局が自ら技術開発したり、先駆的に開発技術を評価、導入するなど多種多様な工法を活用してきた。例として、主カッターでの円形断面の切削と同時に遊星カッターを自転しつつ公転させて切削することで非円形断面を掘削する自由断面シールド工法（1992年）、1台のシールド機で立坑と横坑トンネルを連続して施行する縦横連続シールド工法（1993年）、先行して施工したシールドトンネル外周を拡大シールドによりリング状に掘進し拡大空間を構築する拡大シールド工法（1994年）、円形断面を接合して複円断面としたシールドを地中で分岐することができる分岐シールド工法（1999年）、親機と親機に内蔵された子機により径の異なる管きょを連続的に施工する親子シールド工法（2002年）などがある。

また、コスト縮減と狭小な施工環境で効率的な施工を可能とするため、二次覆工一体型セグメントと、分割構造としたシールド機を組み合わせるシールド機の転用を可能としたコンパクトシールドや推進工法と急曲線を施工できるシールド工法とを組み合わせたデュアルシールド工法（2000年）などが挙げられる。

### 2-5 都市域におけるトンネル技術の課題

これまで述べてきたとおり、東京都下水道局では、都市域における様々な課題を克服するため、技術開発によるトンネル技術の向上を目指してきた。

しかし、都市の地下利用はますます高度化してきている状況にある。さらに、下水道のみならず各種トンネル管理者は、施設の機能向上のほか、老朽化にも直面しており、これらの課題解決のために与えられた時間は限られている。

こうした状況から抽出される今後の都市域におけるトンネル技術の課題は、以下のとおりと考える。

#### 2-5-1 地上への影響をより少なくする工夫

下水道管きょを整備する際には、発進到達立坑用地が必要となるが、この確

保が非常に困難になってきている。多くは公園などの公共空間に求めることになるが、事業には理解を示しても、なじみの公園を使うことに対しては反対されることが多く、この調整に多くの時間を要している。

また、幹線道路上に常設の作業帯を作ることも交通上の制約から非常にハードルが高い。

このため、発進到達立坑用地として使用するスペースをさらに縮小させる工夫が必要である。

## 2-5-2 工事期間を短くする工夫

大規模なシールド工事になると、数年～10年単位の工期が必要となるが、浸水発生地域での雨水対策や老朽化対策が急務となっている現状においては、事業期間を如何に短縮するかが課題となっている。

さらに、上記で述べたように発進到達立坑用地を公園などの公共空間に求める場合、長い事業期間について理解が得られないことも多い。したがって、工期をより短縮し、より事業効果を早く発現させる取り組みが必要である。

## 2-5-3 既設構造物への影響を最小限とする工夫

前述のとおり、都市部では様々な既設構造物を避けて下水道管きょを布設しなければならない、これらの既設構造物に近接して施工する場合には、既設構造物への影響を最小限に留めなければならない。

既設の構造物は、地下鉄や道路、各種ライフラインなど生活に必須のものであり、万一、工事によってこれらの機能を損ねてしまった時の影響は計り知れない。

さらに、これら既設構造物本体のほか、これらを築造する際に建設された仮設構造物が残されていることがある。また、構造物によっては杭基礎が施工され、構造物の下面を通過させることが困難な場合がある。

このため、既設構造物の位置を明らかにするとともに、既設構造物への影響を確実に無くすことができ、支障物を安全に短期間で除去する工夫が必要である。

## [参考文献]

- 1) 下水道事業の変遷と今後の展望 大矢爽治 トンネルと地下 第 34 巻 12 号 2003.12
- 2) シールド工事用二次覆工一体型セグメントの開発とその実用化に関する研究 松浦將行 2013.2
- 3) 第二世代下水道マスタープラン 東京都下水道局 1992.7
- 4) 東京都下水道事業 経営計画 2016 東京都下水道局 2016.2
- 5) 事業概要 平成 29 年度 東京都下水道局 2017.8
- 6) トンネル技術今昔 戸村和彦 トンネルと地下 第 37 巻 6 号 2006.6
- 7) シールド技術変遷史 一般社団法人日本トンネル技術協会 2016.3

## 第3章 超高圧ジェット噴流を活用したトンネル技術の開発

### 3-1 はじめに

本章では、シールド等における支障物処理に関する従来工法とその課題について述べるとともに、超高圧噴流技術によるトンネル工法（D0-Jet 工法）の開発経緯と同工法の「前方探査技術」、「超高圧地盤改良技術」、「切断および切断片の除去技術」の適用範囲拡大のために実施した実験の結果と考察について述べる。

### 3-2 支障物処理の従来工法とその課題<sup>1)</sup>

#### 3-2-1 地上からの撤去

地上から残置杭等を撤去する場合、バイブロハンマ等による引抜きやケーシングとハンマグラブ等により支障物を粉砕、撤去することが一般的である。

また、地上作業は可能だが、他の埋設物と施工機械の干渉により、引抜きや粉砕する工法が適用できない場合や支障物が連続的に存在し、引抜き工法が経済的でない場合には、深礎工法や開削工法等による撤去を行うこともある。

支障物の撤去後は、地盤の緩みの原因とならないよう適切な埋戻しが必要である。

#### 3-2-2 掘進機内から人力による撤去

地上からの作業が不可能な場合は、シールド切羽前面に作業空間を設け、坑内から人力により撤去する方法を適用することがある。この場合には、作業の安全性から一般的には地盤改良を必要とし、坑壁面に矢板を設置するなど土留め支保工を施し、切羽を安全に自立させる必要がある。

坑内から撤去する場合には、作業空間内にいる作業員の安全性を確保するために十分な換気や照明を行うなどの対策も必要となる。シールド機内にマンロックを設け、圧気工法により切羽面での作業ができるようにした例も多い。

ただし、可燃性ガスの発生が想定される地盤（東京都では、洪積層7号地層など）では、鋼材をガスバーナーで切断するなどの火器の使用はできない。

また、既設構造物と一体化している支障物の場合、縁切りなどの処理が必要となり、既設杭等と機能している場合は、アンダーピニングにより受け替えが必要となる。

### 3-2-3 シールド機による直接切削

地上からの作業が不可能な場合や坑内からの撤去に安全性の懸念がある場合、カッターヘッドで直接切削して撤去することになる。直接切削を選定するに際しては、カッターヘッドの損傷程度や切削片の取り込み方法の検討および切削時の振動や周辺地盤の緩みと既設構造物等への影響などの考慮が必要である。なお、支障物の切削に適した特殊ビット、探査ロッド、そしてカッタービットの交換およびメンテナンスを考慮し、シールド前面にマンロックやマンホールを設け、機内から保守点検作業が行えるようにすることが望ましい。

なお、可燃性ガスの発生が想定される地盤では、カッタービットで鋼材を切削する際の高温や火花の発生についての検討・対策が必要である。

## 3-3 超高圧噴流技術によるトンネル工法の開発経緯と特徴

### 3-3-1 超高圧ジェット噴流技術の適用

圧力をかけた水をノズルあるいは小孔から空気中に放出すると水の噴流が形成される。これをウォータージェットと呼ぶが、ウォータージェット噴流の流速が大きい場合、これが物体に衝突すると大きな圧力が発生し、物体を粉砕あるいは切断することができる。ウォータージェットは単位面積当たりの加工エネルギーが極めて大きいことが最大の特徴であり、様々な分野で応用されている。建設分野においても、地盤の切削と改良、杭打設、コンクリートなどの構造物の粉砕、切断などに用いられてきた。ウォータージェットの利用分野を、使用圧力で分類した資料を表 3-1 に示す。

表 3-1 産業分野でのウォータージェットの利用－使用圧力による分類<sup>2)</sup>

圧力(Mpa)	流速(m/sec)	ポンプ	ノズル	利用分野
10 ↓	130 ↓	プランジヤーポンプ ↓	金属硬化処理 ↑ 超硬合金 ↓	・手術 ・一般洗浄 ・表面処理(比較的固結力のないものの処理) ・洗浄(上下水道・船舶ほか) ・地盤掘削
50 ↓	290 ↓			・表面処理(固結力のあるもの) ・洗浄(固結物) ・部品洗浄 ・アトマイズ加工 ・軟岩掘削
100 ↓	410 ↓	↑ プーラーポンプ ↓	↑ セラミック ↓ ↑ サファイア・ルビー ↓ ↑ ダイヤモンド ↓	・表面処理、洗浄(固着物) ・部品洗浄 ・硬岩掘削 ・アスファルト、コンクリートの切断
200 ↓	580 ↓			・硬岩切断 ・コンクリート切断 ・各種材料の切断、加工 ・食品の殺菌

### 3-3-2 超高圧噴流技術の開発コンセプト

東京都下水道局が実施している下水道管きょの再構築工事や浸水対策としての幹線工事などのトンネル工事においては、地中に残置された仮設構造物（木杭、鋼矢板、H形鋼、PC杭等）が支障になり、施工が困難となる現場が多数存在する。また、昨今の社会状況や交通事情から、主要道路などにおいては従来から一般的に採用されてきた開削による支障物の除去が難しい場合が多く、危険が伴う地中内での対応を余儀なくされる状況にあった。

このため、既存の都市トンネル技術を調査したところ、掘進機から支障物を破碎する工法として既に実績を有しているジェットモール工法が挙げられた。ジェットモール工法は、掘進機のカッターヘッドにウォータージェットノズルを装着し、最大圧力 245MPa の超高圧ジェット水を地盤中に噴射して巨礫・転石などの支障物の探査と破碎を行う工法として開発され、1999 年に実用化されている。

東京都下水道局と TGS は、このジェットモール工法を開発した企業等とともに、掘進機内から以下の事項をコンセプトとした開発の可能性について検討した。

- ① 掘進機内から支障物の形状、材質、位置などが判別できる「前方探査」機能を有すること
- ② 掘進に伴う影響を軽減するために必要な範囲内での「地盤改良」機能を有すること
- ③ 支障物（鋼矢板、H形鋼、PC杭、木杭等）を安全、確実に「切断・除去」できる機能を有すること

一方、高硬度材料やガラスなどの切断・加工の分野では、超高圧ジェット水に研磨材を混合する方式（アブレシブジェット）が実用化されている。そこで、上記のコンセプトのもと、支障物対応の技術開発にあたっては、ジェットモール工法の技術を基本に、アブレシブジェットの技術を応用することとして、検討に着手した。

ジェットモール工法は、超高圧で水を噴射して巨礫・転石などを破碎できるものの、鋼材などの高硬度の材料に対しては切断能力に限界があることから、まず、鋼材の切断を第一目標に、切断と地盤改良を 1 つのノズルで対応する多目的ノズル（現在は切断と地盤改良を別々のノズルとしている）の検討を進めた。多目的ノズルは、研磨材や地盤改良材などをアブレシブラインから供給し、噴射直前にジェットラインと混合する方式としている。2002 年に、東京都下水道局南部建設事務所において、多目的ノズルを使用して鋼矢板や PC パイルの

切断に関する公開実験を行った結果、鋼材が切断できることを確認できた。こうした中、この技術を D0-Jet 工法 (Double Object Jet Method) として開発をスタートさせた。

D0-Jet 工法の開発スタート時には、東京都下水道局で計画されていたトンネル工事で、地中支障物の切断除去が可能な口径  $\phi 1500\text{mm}$  以上に対応した掘進機の開発を進めた。2004 年には、実機による地盤改良および切断実験を行い、技術の確実性が確認できたことから、2006 年に D0-Jet 工法として「技術資料」や「積算資料」を作成し、工事の設計および施工管理体制を整備した。

当時の切断実験の状況を写真 3-1 に示す。



公開実験(鋼矢板切断)2002 年



実用機(鋼矢板切断)2004 年

写真 3-1 切断実験状況

超高圧地盤改良では、噴射エネルギー（圧力×流量）が大きいほど短時間で地盤を掘削し、地山を改良材に置き換えることが可能である。ここで、噴射エネルギーを上げるために流量を大きくすると地盤掘削から改良体の造成までに噴射する改良材の廃棄量が増える。したがって、同じ噴射エネルギーを得るためには、流量を一定として圧力を上げることが経済性や環境面で現実的である。そこで、D0-Jet 工法の地盤改良に用いる最大圧力は、当時の国産で最大圧力の仕様である  $245\text{MPa}$  とした（表 3-1 参照）。



### 3-3-3 D0-Jet 工法のシステムと実績

シールド掘進機に装備が可能で、水平のみならず上方への地盤改良を可能とする 2 液混合噴流を用いた超高压ジェットシステムを開発した。

2 液混合噴流は、ノズルから噴射する直前に 2 種類の液体を混合するもので、それぞれの液体の種類および圧力、流量を噴射の目的に応じて適切に設定することにより、その効果を最大化することが可能である。

図 3-1 は、超高压ジェットに用いる 2 液混合ノズルの構造などを示したものである。2 液混合ノズルはジェットラインから超高压の珪酸ナトリウム溶液が、アブレシブラインから低圧の液体がそれぞれ供給され、ミキシング室内で混合した液体をアブレシブノズルから 2 液混合噴流として噴射するものである。

2 液混合ノズルは、図 3-2 に示すように、地盤改良用ノズルと切断用ノズルから構成されており、掘進機の前面に装着される。2 液混合ノズルのアブレシブラインに供給される液体は、地盤改良を行う場合にはセメントミルクであり、地中支障物の切断を行う場合には研磨材と硬化剤を混合したアブレシブスラリーである。いずれの場合も混合した流体は珪酸ナトリウムと反応し早期にゲル化し、掘削空間は非流動性の物質で充填されることから、地盤の変状が抑止される。ノズルの移動は掘進機のカッターヘッドの微速回転によるほか、必要に応じてカッターヘッドの半径方向に移動可能な移動システムを用いて行う。

このように、D0-Jet 工法は、鋼材などの支障物に超高压のアブレシブスラリーを噴射して切断および除去するため、可燃性ガスの発生が想定される地盤においても作業の安全性が高い工法である。

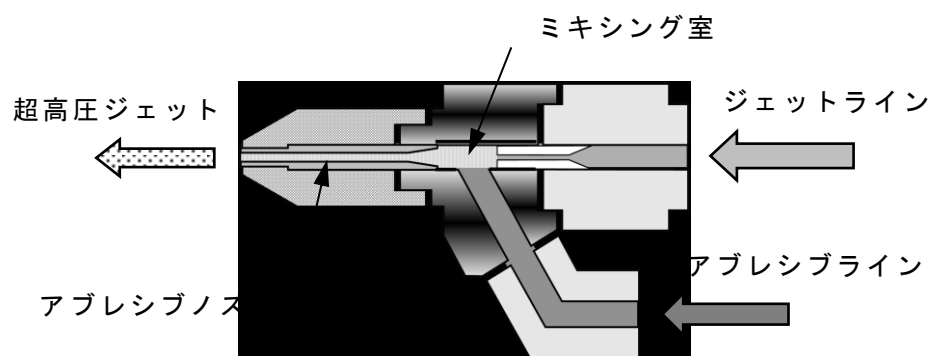


図 3-1 2 液混合ノズルの構造

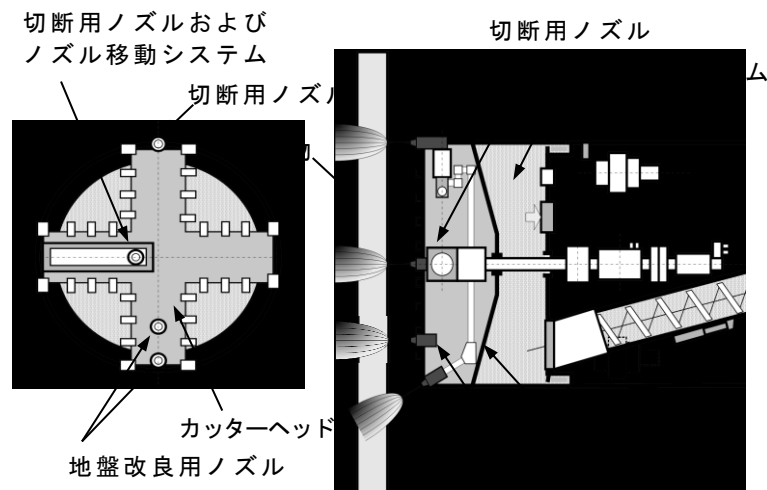


図 3-2 掘進機への 2 液混合ノズル装着概要図

開発した D0-Jet 工法は、表 3-2 に示すように 2005 年以降 6 か年の間に、推進工法では口径 1500mm 以上 5 件、シールド工法では掘進機外径 2130mm 以上 4 件が採用され実績を積み重ねてきた。

表 3-2 D0-Jet 工法施工実績表（2005 年～2010 年）

No.	工事件名	発注者	工事概要	D0-Jet工法 工事期間	D0-Jet工法施工数量等
1	第二十二社幹線暫定貯留に伴う切替その2工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,650mm L=393.3m	2005.4-2006.4	・切断除去 H鋼-350 3ヶ所 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良
2	港区赤坂一丁目・六本木二丁目付近再構築その2工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,500mm L=334.8m	2005.3-2005.11	・切断除去 RC杭-φ 400 2ヶ所、H鋼-250 2ヶ所 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良
3	中央区八重洲一丁目・日本橋三丁目付近再構築その3工事	東京都 下水道局	推進工法 口径2,200mm L=157.2m	2005.7-2005.12	・切断除去 松杭、φ 180mm 2ヶ所(35+28=63本) ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良、首都高速道路横断橋橋台杭防護
4	群馬用水吾妻川サイホン併設水路工事	独立法人 水資源機構	シールド工法 掘進機外径 2,480mm L=1260.6m	2006.1-2007.3	・破砕除去 巨礫(2000mm)層 L=約800m ・超高圧地盤改良 ビット交換2地点の地盤改良
5	品川区東品川一丁目、北品川二丁目付近再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,500mm L=314.1m	2006.6-2007.5	・切断除去 SPⅢ型全面 1ヶ所、H鋼-300 1ヶ所 4本 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良
6	港区西麻布二丁目、南青山二丁目付近再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,650mm L=362.5m	2006.9-2007.3	・切断除去 既設青山幹線基礎松杭(φ 150、38本) ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良、既設青山幹線防護
7	新宿区住吉町、片町付近再構築工事	東京都 下水道局	シールド工法 掘進機外径 2,280mm L=254.1m	2006.9-2007.10	・切断除去 既設市ヶ谷幹線基礎松杭(φ 150、840本) ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良、既設市ヶ谷幹線防護
8	新宿区住吉町、片町付近再構築その4工事	東京都 下水道局	シールド工法 掘進機外径 2,280mm L=194.3m	2007.11-2008.7	・切断除去 既設幹線基礎松杭(φ 150、640本) ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良、既設幹線防護
9	勝島幹線その2工事	東京都 下水道局	シールド工法 掘進機外径 2,130mm L=394.7m	2010.9-2010.12	・切断除去 既設ボックスカルバート基礎杭(RC杭: φ 350 4本) ・超高圧地盤改良(2工程方式) 支障物周辺の地盤改良、既設ボックスカルバート防護

### 3-4 小・中口径掘進機の開発

これまで開発を進めてきた D0-Jet 工法の適用口径は、推進工法において口径 1500mm 以上、シールド工法においてはセグメント内径 1800 mm 以上を対象とされていた。これは、D0-Jet 工法の基本概念として地中支障物切断後の切断片が回収できる最小の口径と位置付けているためである。

しかし、東京都をはじめとする大都市の自治体では、口径 800～1350mm の推進工法においても、仮設物等の地中支障物に遭遇した場合、交通量や輻輳する埋設物の設置状況から地中支障物の除去への対応が困難となることが多く、この技術開発に対する高いニーズが存在していた。

そこで、口径 800～1350mm に適用できる掘進機を開発することとした。開発にあたっては、D0-Jet 工法の口径 1500 mm 以上の掘進機が有していた超高压関連機器類を狭隘な限られた空間に配置することや切断用および地盤改良用ノズルの配置、ノズルやノズル移動システムおよび配管などを装着したカッターヘッドの強度などについて検討し、設計することが必要である。

表 3-3 に従来の口径 1500mm 以上の掘進機から小・中口径 800～1350mm に改良するにあたっての課題と検討内容を示す。

表 3-3 小・中口径掘進機の改良における課題と検討内容

基本機能	課題	検討内容
前方探査	支障物がどの位置にあっても噴射により位置を確定できること	探査用に使用する切断ノズルの位置検討
超高压地盤改良	掘進機前面および外周を改良できること	掘進機外周部の地盤改良用ノズルの配置検討
切断および切断片の除去	支障物を切断し、切断片を排泥口に取込むことができること	切断用ノズルの配置、ノズル移動システムの配置検討
	切断片を取り込むことのできる排泥口を設けること	排泥口の位置・形状の検討
掘進機の構造	超低速回転用カッターモータの設置位置およびコンパクト化	構造の検討 (モータ式、ジャッキ式)
	スキンプレートの強度が外力に対して許容応力を持つこと	構造計算
	カッターの装備トルクが所要トルクに対して安全であること	装備トルクおよび所要トルクの計算結果の比較
	カッターヘッドの強度が外力に対して許容応力を持つこと	構造計算

### 3-5 掘進機の設計

#### 3-5-1 掘進機の構造検討および設計

超高圧ジェットシステムを搭載した口径 800～1350 mm の掘進機の開発では、その機能を十分に発揮するために、切断用ノズルおよび切断用ノズルの移動制御を行うノズル移動システム、地盤改良用ノズル、掘進機のカッターヘッドを切断時に超低速で回転させる超低速回転機構などの装置の配置と装置が稼働し所定の性能を満足するための構造の検討が必要となった。

そこで、掘進機における掘削・排土方式別の排泥口径と回収可能な切断片の大きさを検討条件として、最適な掘削・排土方式を選定した。検討の結果、表 3-4 に示すように 200～400mm 程度の切断片の取り込みが可能な泥濃方式の適用が妥当と判断し、掘進機の構造検討を行うこととした。

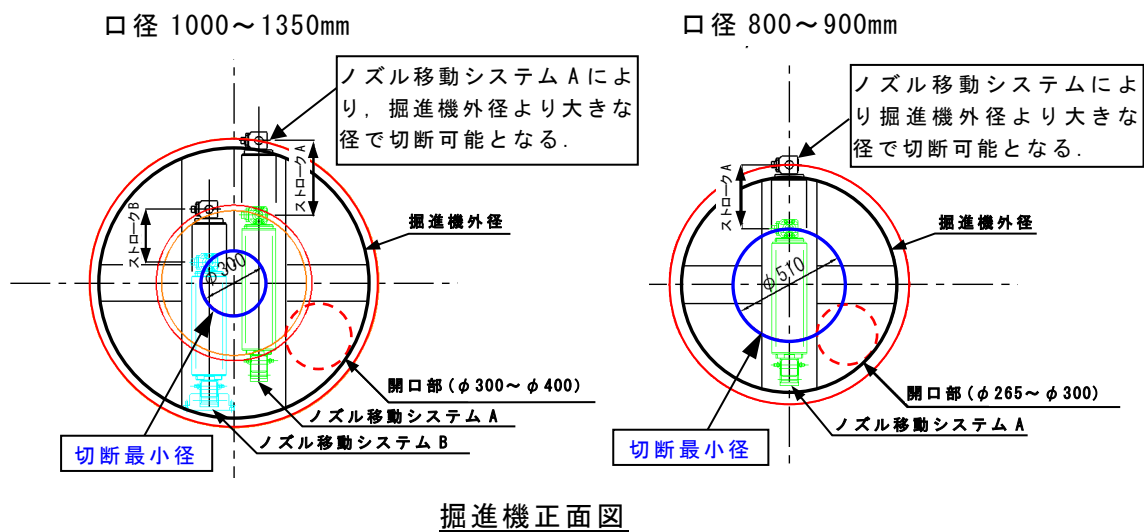
表 3-4 掘削・排土方式の検討結果（口径 800～1350mm）

	一般的な排泥口径	切断片の大きさ	適用性
泥水方式	100mm～150mm 程度	50mm 程度	×
土圧方式	250mm～300mm 程度	170mm 程度	△
泥濃方式	200mm～400mm 程度	200mm～400mm 程度	○

#### 3-5-2 切断用ノズルの配置検討

口径 800～1350mm で切断用ノズルの配置を検討した結果、従来の D0-Jet 工法と同じようにノズル移動システムを配置することができず、口径 800mm と 900mm ではノズル移動システム 1 本のみを配置し、口径 1000～1350mm では縦に 2 本のノズル移動システム A、B を並べる形で配置した。

図 3-3 に示すように、切断片の最大寸法は、口径 1000～1350mm の掘進機の場合は  $\phi 300$ mm 以下、口径 800～900mm の場合は  $\phi 510$ mm 以下となる。また、掘進機の開口部の大きさは、口径 1000～1350mm の掘進機の場合は  $\phi 300 \sim 400$ mm、口径 800～900mm の場合は  $\phi 265 \sim 300$ mm となる。ここで、開口部の大きさはカッタースポークの内接円の内側とする。口径 800～900mm で、広幅の H 形鋼や鋼矢板等が図 3-4 に示すように掘削中心部に位置する場合は、切断片の最大寸法が  $\phi 510$ mm で取込みが不可能になるため、支障物がノズルの移動範囲に位置するなどの条件が付くことになる。



(mm)

口径	ストロークA	ストロークB	開口部径
1000	345	245	300
1100	345	285	325
1200	345	345	330
1350	345	435	400

(mm)

口径	ストロークA	開口部径
800	290	265
900	355	300

図 3-3 切断用ノズル配置検討図

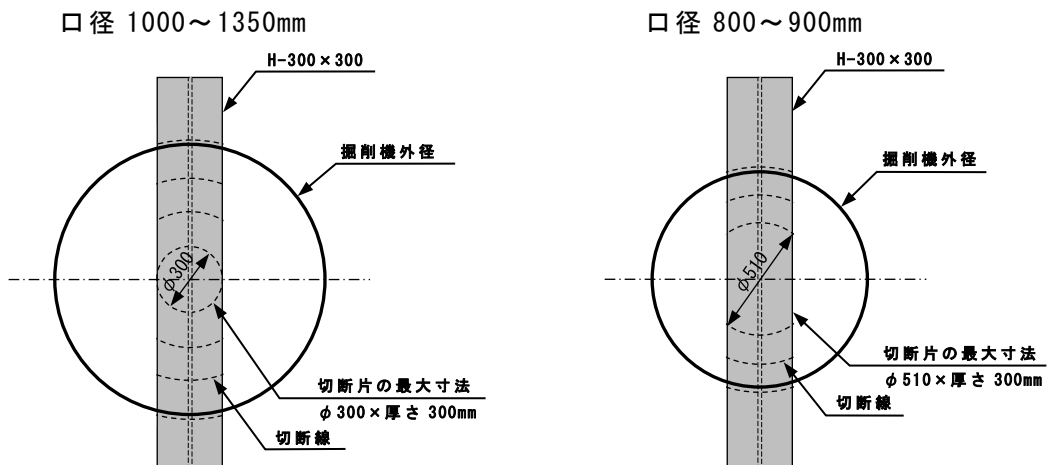


図 3-4 掘削中心部に H 形鋼が残置している場合の切断計画の例

### 3-5-3 最大切断片の取込みに関する検討

支障物切断後の切断片の大きさは、各口径ともカッターヘッド中心部の未切断部が最大となる。この最大切断片をカッターチャンバから掘進機内に取り込むための排泥口の寸法を検討した。口径 1000～1350mm の掘進機では、隔

壁の下部に矩形状に排泥口を設けることができたが、口径 800～900mm では、設置空間の確保が困難なため、隔壁側部に円形状に設けることとした。

図 3-5 に排泥口の配置および寸法図を示す。口径 1100～1350mm の掘進機は、排泥口の寸法が最大切断片の大きさ  $\phi 300\text{mm}$  を上回るため、切断片の取込みが可能である。口径 1000mm は排泥口の高さが、最大切断片の大きさ  $\phi 300\text{mm}$  に対して不足しているため、実験により取込み状況を検証する。

口径 800～900mm では、排泥口が開口部径よりも小さく、取込み可能な切断片の寸法の検討が必要となるとともに、支障物がノズルの移動範囲に位置するなどの条件が付くことになる。

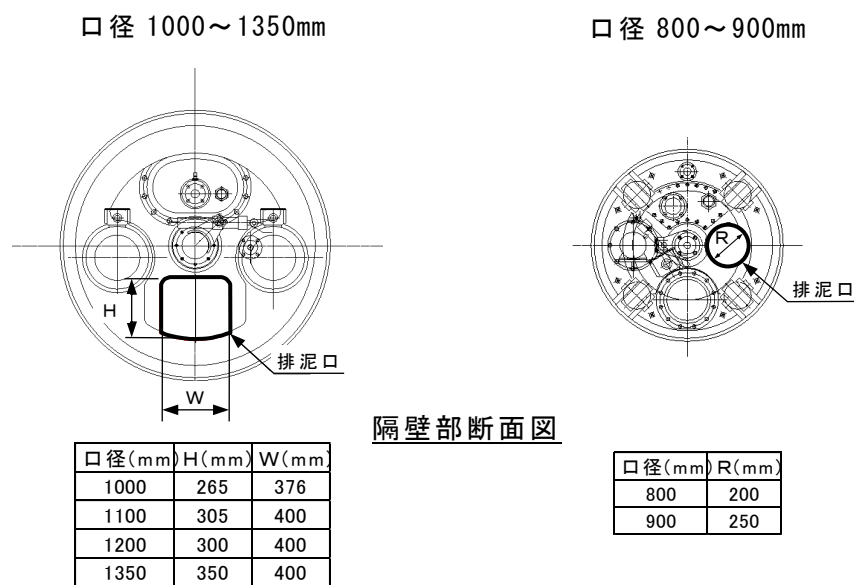


図 3-5 排泥口の配置および寸法図

#### 3-5-4 地盤改良用ノズルの配置検討

地盤改良用ノズルの配置は、掘進機外周部の地盤改良（掘進機外径より 800mm 外側までを標準とする）を施工することを基本条件として検討を行った。地盤改良用ノズル 1 本あたりの造成径は  $\phi 800\text{mm}$  を基本にしており、 $\phi 800\text{mm}$  の改良体を円周上に造成することによりドーナツ型の改良範囲を施工することができる。このドーナツ型の改良範囲が掘進機外径に 800mm を加えた範囲をカバーするように地盤改良用ノズルを配置する。

検討の結果、掘進機の外周の地盤改良には口径 1500mm 以上の掘進機と同様に、ノズルを水平から  $25^\circ$  外側に向けて装着することで対応する。地盤改良用ノズルの数は、口径 1200～1350mm の掘進機で 3 個、口径 800～1100mm で 2 個を配置することとした。図 3-6 に口径 1350mm および口径 800mm の掘

掘進機における地盤改良用ノズルの配置図を示す。

なお、実工事への適用においては、支障物の位置や規模、地盤条件等に対応できるように地盤改良用ノズルの配置およびノズルの角度をその都度検討する必要がある。

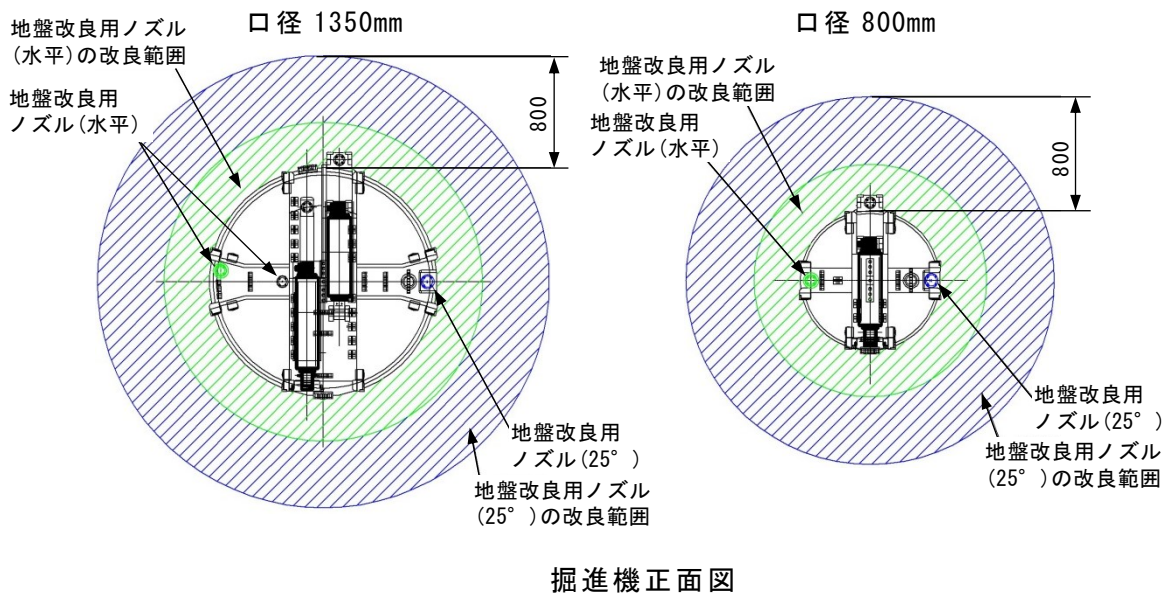


図 3-6 地盤改良用ノズル配置検討図（口径 1350mm，800mm）

### 3-5-5 ノズル以外の D0-Jet 工法の機能の装備について

#### 3-5-5-1 カッターヘッドの超低速回転機構について

D0-Jet 工法の掘進機に装備するカッターヘッド駆動装置は、口径 800～900mm で 1 基、口径 1000～1350mm で 2 基としている。また、本工法には支障物の位置、形状等を正確に把握して切断するために、前方探査時と支障物切断時にカッターヘッドを周速 5～100mm/min の超低速で回転させる装置（以下「超低速回転用微速モータ」という。）を装備する必要がある。

口径 800～900mm では、カッターヘッド駆動装置 1 基の装備により、掘進機内に超低速回転用微速モータの設置空間を確保することが可能であるが、口径 1000～1350mm では困難となる。そのため、口径 1000～1350mm では、カッターヘッド駆動装置の後方の空間に超低速回転用微速モータを取り付け、カッターヘッド駆動装置を制御する機構とした。

### 3-5-5-2 超高圧発生装置の設置について

発進立坑から D0-Jet 工法を施工する位置までの距離が 400m を越え、かつ口径 1800mm 以上の場合は、基本的に写真 3-2 に示すように超高圧発生装置を坑内に設置するが、口径 800～1650mm では坑内に設置できないため、地上の作業ヤードに設置する。

口径 1800mm 以上と口径 800～1650mm のそれぞれの切断施工時のライン設備図を図 3-7 および図 3-8 に示す。



写真 3-2 超高圧発生装置の坑内設置状況



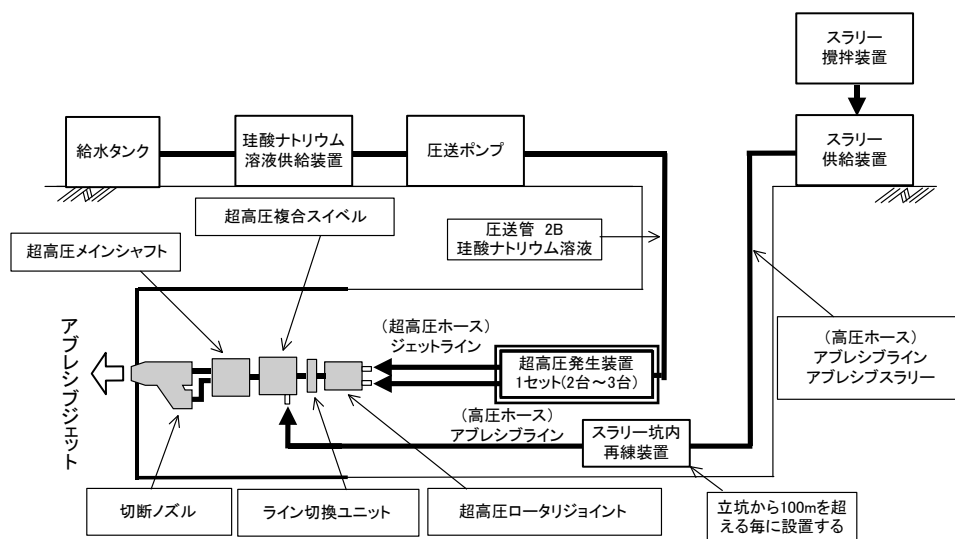


図 3-7 切断施工時のライン設備（口径 1800 mm 以上）

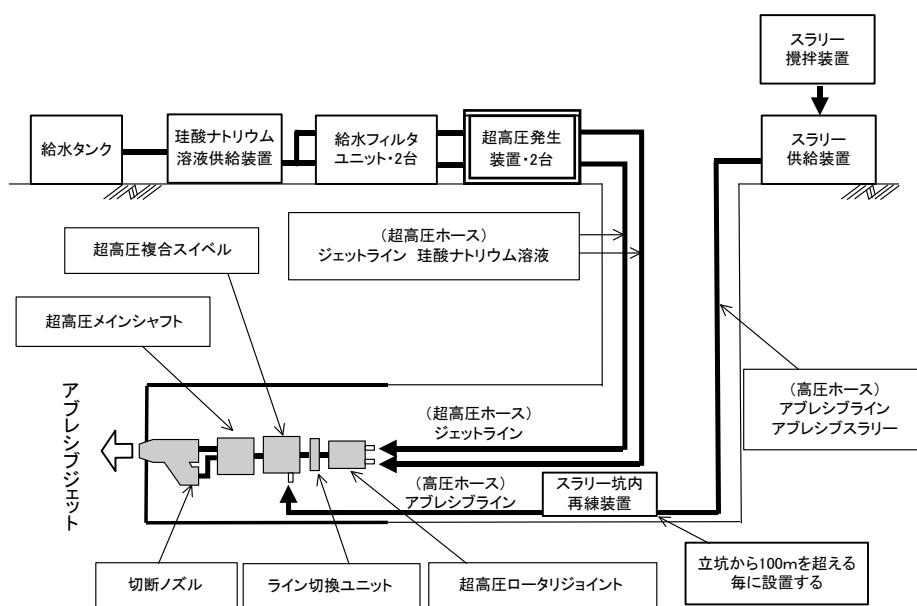


図 3-8 切断施工時のライン設備（口径 800～1650mm）

### 3-5-6 掘進機の構造検討

トンネル標準示方書（シールド工法編）<sup>3)</sup>には，一般的なシールド掘進機の構造の検討として，スキンプレーットの強度とカッタートルクの計算が上げられている．

#### 3-5-6-1 スキンプレーットの強度計算

スキンプレーットの強度は，地下水圧と土圧，地盤反力，掘進機自重による反力が掘進機の外殻となるスキンプレーットの許容応力を超えないようにする．

各口径において最大応力と許容応力の比較を行った結果，最大応力が許容応力の1割～1.5割程度となり，スキンプレーットの強度は発生する応力に対し十分に強度を有していることを確認した．表3-5にスキンプレーットの強度計算に用いた掘進機の諸元，表3-6に計算条件および表3-7に計算結果を示す．

表 3-5 掘進機の諸元

掘進機口径	mm	800	900	1000	1100	1200	1350
掘進機外径	m	0.980	1.100	1.250	1.330	1.450	1.620
掘進機機長	m	2.215	2.215	2.660	2.660	2.840	2.840
掘進機半径	m	0.490	0.550	0.625	0.665	0.725	0.810
掘進機重量	t	5.8	7.5	9.7	11.0	13.0	17.0
スキンプレーット板厚	mm	12	12	16	16	19	19

表 3-6 計算条件

設計条件	単位	設定値	設計条件	単位	設定値
土質		土水分離	側方土圧係数		0.55
土被り	m	7.370	地盤反力係数	MN/m <sup>3</sup>	50
地下水位	m	6.370	上載荷重	kN/m <sup>2</sup>	10.0
土の単位体積重量 （地下水位以上）	kN/m <sup>3</sup>	18.00	スキンプレーットの材質		SS400
土の単位体積重量 （地下水位以下）	kN/m <sup>3</sup>	8.00	材料の弾性係数	kN/mm <sup>2</sup>	210
内部摩擦角	度	30.0	材料の許容応力	N/mm <sup>2</sup>	160

表 3-7 スキンプレートの強度計算結果

(N/mm<sup>2</sup>)

口径 (mm)	800	900	1000	1100	1200	1350
最大応力発生点 (°)	180	180	180	180	180	180
最大応力	21.7	25.0	19.9	21.2	19.2	22.5
許容応力	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0	160.0
判定	○	○	○	○	○	○

### 3-5-6-2 カッタートルクの検討

カッタートルクは、カッター回転時に作用する土の摩擦抵抗、切削抵抗および軸受抵抗などの抵抗トルクの総和(所要トルク)が掘進機に装備しているカッタートルク(装備トルク)を超えないようにする。

地質の変化、油圧機器の効率、ジャッキによる無理押し等を考慮すれば所要トルクの2割り増し程度の装備が必要となる(余裕率>1.2)。

各口径において、所要トルクと装備トルクの比率による余裕率を算出した結果、すべての口径において許容値である1.2を上回る数値となり、装備トルクは所要トルクより十分に余裕があることを確認した。

表 3-8 カッタートルクの計算結果

(kN・m)

口径 (mm)	800	900	1000	1100	1200	1350
所要トルク	7.76	11.15	15.01	17.65	21.93	27.78
装備トルク	15.80	23.40	39.00	52.20	84.00	118.20
余裕率	2.04	2.10	2.60	2.96	3.83	4.25
判定	○	○	○	○	○	○

### 3-5-6-3 カッターヘッドの強度の検討

超高圧ジェットシステムを搭載した掘進機のカッターヘッドは、ノズル移動システムの配置や噴射材供給用の配管等で一般的な掘進機と構造が異なる。

このため、表 3-9 に示すように掘進時に作用する外力から最大応力を算出し、カッターヘッドの強度について検討した結果、全ての口径で、「最大応力<許容応力」となり、強度計算において問題ないことが確認できた。

なお、本計算で用いた荷重条件は、推進時の先端抵抗よりさらに安全側となる方向修正ジャッキによる単位面積当たりの最大推力を用いて検討した。

表 3-9 カッターヘッドの強度計算結果

	(N/mm <sup>2</sup> )					
口径(mm)	800	900	1000	1100	1200	1350
最大応力	103	82	147	130	109	110
許容応力	160	160	160	160	160	160
判定	○	○	○	○	○	○

### 3-5-7 基本設計および検討結果のまとめ

基本設計および検討の結果より、各口径別に搭載する装置類の仕様を表 3-10 に示す。以上より、口径 800～1350mm では、従来の D0-Jet 工法の装置の仕様などと多少異なる部分が生じるものの、D0-Jet 工法に必要な装置の配置が可能となる結果となった。

表 3-10 D0-Jet 装置の仕様

口径 (mm)	800	900	1000	1100	1200	1350
地盤改良用ノズル(個)	2	2	2	2	3	3
切断用ノズル (個)	1	1	2	2	2	2
ノズル移動システム A(本)	1	1	1	1	1	1
ストローク (mm)	290	355	345	345	345	345
ノズル移動システム B(本)			1	1	1	1
ストローク (mm)			245	285	345	435
開口部径 (mm)	265	300	300	325	330	400
排泥口径 (mm)	200	250	376×265	400×305	400×300	400×350
カッター低速回転機構	超低速回転用微速モータ					
ジェットラインおよび アブレイブラインの接続	超高圧メインシャフト に直接接続		ジェットライン⇒超高圧ロータリージョイント アブレイブライン⇒超高圧複合スライデル			

### 3-6 口径 1000 mm 対応の超高圧ジェットシステム

D0-Jet 工法は「前方探査」、「超高圧地盤改良」、「切断および除去」の 3 つの基本機能から構成されている。前節の検討結果に基づき、口径 800～1350mm を代表して口径 1000mm 対応の超高圧ジェットシステムを装備した実機を製作し、実規模の試験地盤において、前方探査、超高圧地盤改良、切断および切断片の除去後の掘進までの一連の工程において実験を行い、これまで口径 1500mm 以上の掘進機で得ていた実績<sup>4)</sup>と実験結果を比較し、小・中口径（口径 800～1350mm）における 3 つの技術の適用性を評価した。

実験は、N. JET エンジニアリング(株)戸出機材センター（富山県高岡市）で実施した。



写真 3-3 口径 1000mm の掘進機

### 3-6-1 前方探査技術の評価

#### 3-6-1-1 音響現象を活用した前方探査技術の概要

前方探査は、掘進機のカッターヘッドに装備したノズルから超高圧のジェット水（100MPa）を支障物に噴射してその反射音を音響センサで捉えて解析し、支障物の位置、材質、形状寸法、範囲を明らかにするとともに、その結果を基に地盤改良計画、切断計画を作成するために開発された技術である。

図 3-9 に前方探査のシステムの概要を示す。また、写真 3-4 には、掘進機内に取り付けた音響センサの例を示す。

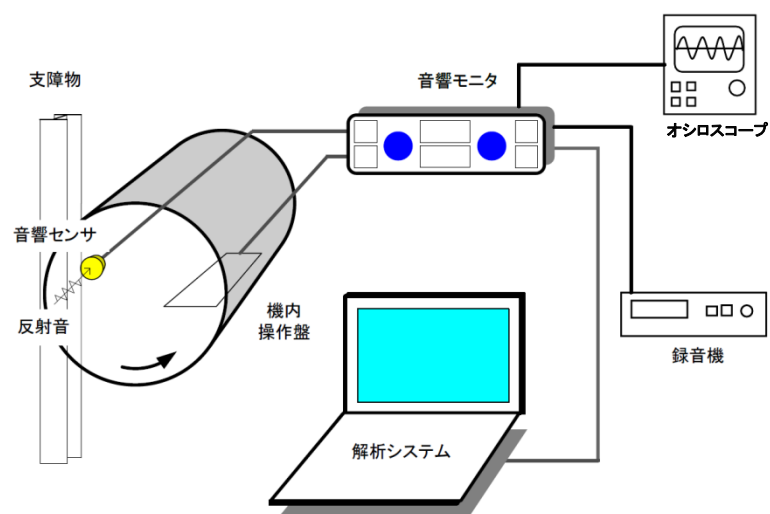


図 3-9 前方探査のシステムの概要



写真 3-4 掘進機内の音響センサ取付箇所

### 3-6-1-2 実験内容および目的

本実験では口径 1000mm の実機を使用して超高压ジェット水を噴射し、反射音の受信、解析を行い、前方探査の精度、カッターヘッドの超低速回転機構の稼働確認、作業性および安全性を確認する。なお、口径 1000～1350mm に装備するカッターヘッドの超低速回転機構は、「3-5-5-1 カッターヘッドの超低速回転機構について」に述べたように従来の口径 1500mm 以上に装備していた仕様から変更している。そのため、本仕様の超低速回転用微速モータにより、カッターヘッドが所定の回転に制御されているかを確認する。実験は、表 3-11 に示す確認項目、測定箇所、頻度、方法にて実施した。

表 3-11 確認項目

項目	測定箇所	頻度	方法
前方探査の精度	試験地盤内 掘進機内	H 形鋼設置時 探査材噴射後	支障物の設置位置と解析データを比較
超低速回転機構の稼働状況	掘進機内	カッターヘッドの微速回転中	カッター回転計の確認
作業性・安全性	掘進機内	前方探査の準備・ 施工・片づけ時	掘進機内の移動、音響センサの設置、撤去

### 3-6-1-3 支障物の設置および試験地盤の造成状況

実験は写真 3-5, 3-6 に示すように、試験フィールド内に支障物(H 形鋼(H-300×300×10×15))を設置し、山砂(礫混じり砂)で造成した試験地盤内で前方探査を行った。試験フィールドは写真に示すように狭所なため、一層巻き出し厚 30cm としてタンピングランマー等を使用して転圧・締固めを行った。実験の概要を図 3-10 に示す。また、前方探査用のノズルは図 3-11 に示すように、外周切断ノズルを使用した。



写真 3-5 支障物設置状況



写真 3-6 支障物埋戻し状況

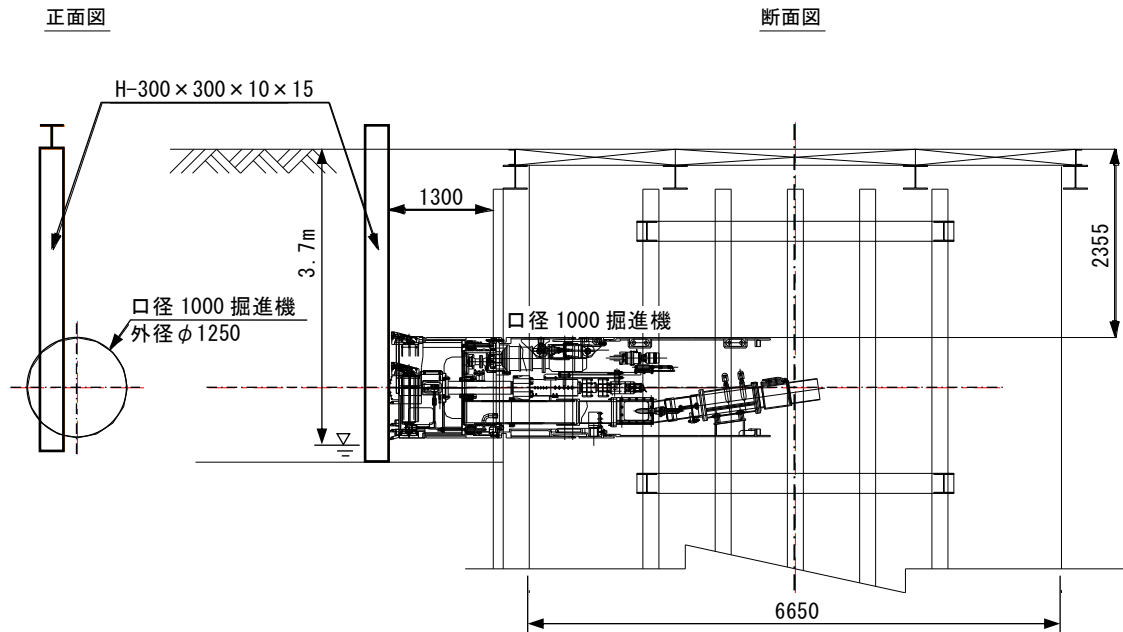


図 3-10 前方探索概要図（正面図，断面図）

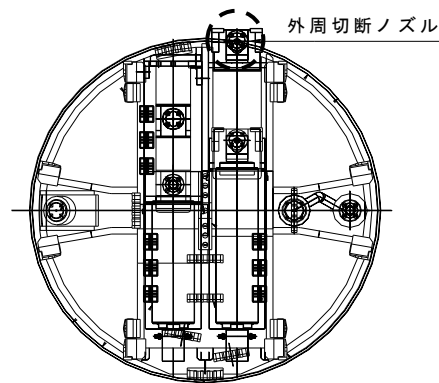


図 3-11 外周切断ノズル配置図

前方探索に使用するジェット水の噴射時間を表 3-12 に示す。

表 3-12 前方探索実施結果

カッター 回転回数	ノズル※ 移動速度	開始時刻	終了時刻	噴射時間
1 回目	100mm/min	8 : 50	9 : 31	0 : 41
2 回目	50mm/min	9 : 50	11 : 12	1 : 22

※1 回目：支障物の大まかな位置を探索

※2 回目：詳細な探索（1 回目より移動速度を遅く設定）



#### 3-6-1-4 使用材料

前方探査に使用するジェット水（探査材）の配合を表 3-13 に示す．

表 3-13 前方探査の使用材料

探査材	珪酸 Na 溶液 (200ℓ当り)	水	珪酸 Na	—
		180 ℓ	20 ℓ	—
	硬化剤溶液 (200ℓ当り)	水	硬化剤	ポリマー
		114.8 ℓ	100 kg	49.2 kg

#### 3-6-1-5 前方探査における反射音の波形の解析

前方探査における波形の解析結果を図 3-12 に示す．

なお，試験地盤の埋戻し前に実測した H 形鋼の位置は，掘進機中心底部からフランジ端部までの水平距離が 162mm であった．

解析図から確認できた事項を以下に示す．

- ・ 実測とほぼ同じ位置になる掘進機底部付近では，探査材が支障物に衝突した時に現れる波形の変化点までの水平距離が読み値で①155mm，②465mm となり，①と②の間に幅 300mm の H 形鋼の存在を推定できる．
- ・ 掘進機中心頂部付近において，下部と同様に波形が変化していることから，幅 300mm の H 形鋼の存在を推定することができる．
- ・ 探査材が H 形鋼の上下部を通過する際は，波形が高い位置でほぼ水平に移動していることから，探査材の噴射方向に対して垂直な面が存在している．

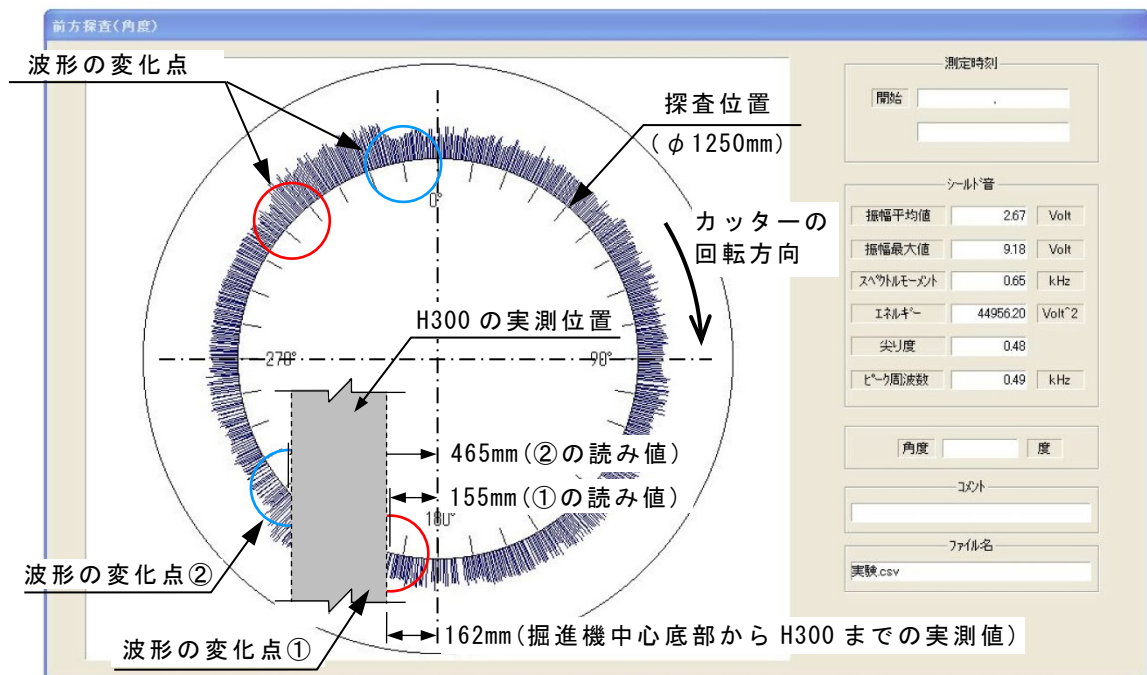


図 3-12 前方探査解析

### 3-6-1-6 実験結果の考察

#### 1) 解析結果

波形を解析した結果、H 形鋼の位置は、図 3-12 に示すように、支障物の設置位置とほぼ同位置で、同一の形状寸法であることが確認されたことから、これに基づいて地盤改良計画図、切断計画図を作成した。各計画図を図 3-13 に示す。

実工事では、事前調査による地山の状態や近接構造物の有無、残置杭であるか否か等により、地盤改良範囲を決定する必要があるため、H 形鋼（支障物）の位置により、図 3-13 に示すように掘進機外周の半断面を地盤改良範囲とする場合や H 形鋼の上下部分を地盤改良範囲とする場合がある。本実験は小・中口径の掘進機による改良体の出来形や強度の確認を目的としているため、H 形鋼の上部のみを対象として改良体を 2 本造成する。

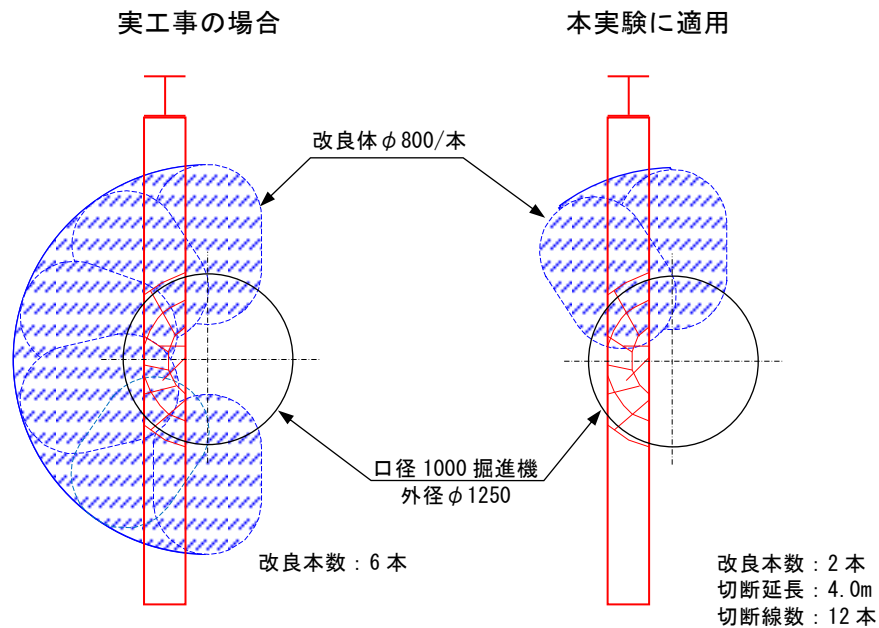


図 3-13 地盤改良計画図および切断計画図

## 2) 稼働確認について

超低速回転用微速モーターによるカッターヘッドの回転制御については、事前に操作盤による回転数の表示値とカッターヘッドの回転数の同調を確認したうえで、前方探査実験の1回目、2回目を実施した結果、いずれも計画した回転数による制御で支障物の位置、形状などの解析データを得ることができた。

これにより、小・中口径化による超低速回転用微速モーターを使用した前方探査は、従来口径（1500mm以上）と同様に実施可能であることが確認できた。

## 3) 前方探査における作業性および安全性の確認について

前方探査に必要な音響センサは掘進機隔壁部に取付ける。取り付け作業は、掘進機の小・中口径化により、スペースが狭く、不安定な作業となるが、センサはマグネット式の取付けとしたことから、特に工具を使用せず、極端な作業性の低下はないと考える。

超高压ジェット水噴射中の作業は、掘進機操作台車と前方探査に必要な機材を地上に設置して作業を行ったが、通常施工時は推進管の中に操作台車、機材を持ち込んで作業を行う必要がある。したがって、小・中口径化による若干の作業性、安全性の低下は想定されるが、前方探査の機器類は掘進機内には持ち込まず、推進管内に設置して操作するため、施工上問題ないとする。

### 3-6-2 超高圧地盤改良技術の評価

#### 3-6-2-1 実験内容および目的

試験地盤築造後，地盤改良ノズルより改良材を超高圧（245MPa）で噴射し，造成された地盤改良の範囲および強度，地表面の変位量，改良材の打込み量，排泥の性状，切羽圧力の確認を行い，口径 1000mm の掘進機で従来と同様に超高圧地盤改良の機能を満足するための動作について検証する．なお，「3-6-1-6 実験結果の考察」で述べたとおり，改良本数は 2 本とした．試験地盤は，山砂（礫混じり砂）を巻出し厚 30cm で転圧・締固めた．地下水は GL-3.7m 付近にあるが，切羽に泥土圧を与え，飽和地盤を模擬して実験を行った．

実験は，表 3-14 に示す確認項目，測定箇所，頻度，方法にて実施した．

表 3-14 確認項目一覧

	項目	測定箇所	頻度	方法
1	地盤改良範囲	試験地盤内	確認掘削時	改良体出来形測定および掘削機からの距離測定
2	地盤改良強度	改良体	確認掘削時	サンプリングコアの強度試験
3	地表面の変位	立坑地表面 (21 測点)	改良材の 噴射前・噴射後	レベル測量
4	打込み量	作液プラント	改良材の噴射後	作液量測定
5	排泥性状	排出口	改良材の噴射中	排泥の比重・粘性・ 温度の測定
6	排泥量	排泥ピット	改良材の噴射後	排泥ピットの深さ測定
7	切羽圧力	切羽	改良材の 噴射前・噴射中	土圧計にて確認
8	作業性・安全性	掘進機内	地盤改良の準備・ 施工・片づけ時	掘進機内の移動，噴射材 供給ラインの接続切替え

### 3-6-2-2 噴射時間および噴射位置

改良材等の噴射時間を表 3-15 に、噴射位置を図 3-14 に示す。

表 3-15 地盤改良工実施結果

噴射番号	開始時刻	終了時刻	噴射時間
改良①	10 : 00	10 : 17	0 : 17
改良②	13 : 25	13 : 42	0 : 17

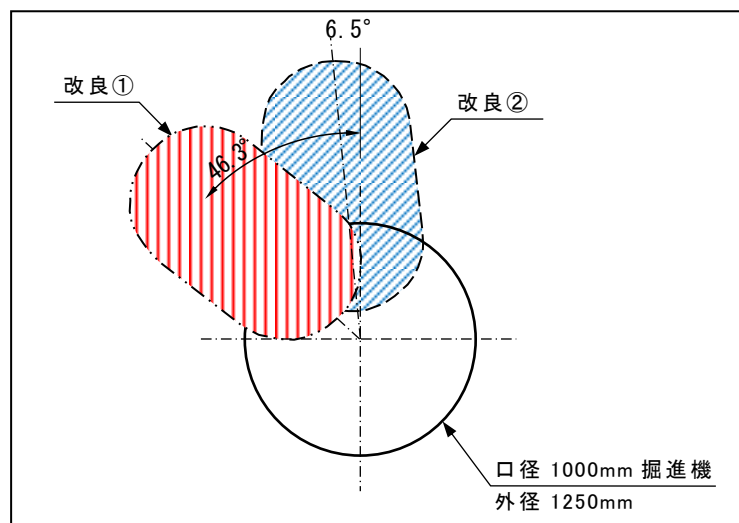


図 3-14 掘進機側からの噴射位置図

### 3-6-2-3 使用材料

地盤改良で使用する材料の配合を表 3-16 に示す。

表 3-16 地盤改良の使用材料（1m<sup>3</sup>当り）

改良材	セメントミルク (割増 1.6 倍)※1	水	早強セメント	混和剤		
		596.7 ℓ	1216.0 kg	19.2 kg	—	—
	超高压ジェット 水	水	珪酸 Na			
		900 ℓ	100 ℓ	—	—	—
加泥材	加泥材	水	粉末粘土	増粘材	目詰材	遅延剤
		884.6 ℓ	240 kg	1.8 kg	10.0 kg	7.0 ℓ
洗浄材	ポリマー溶液 ※2	水	ポリマー			
		5.0 ℓ	5.0 ℓ	—	—	—

※1：D0-Jet 工法では，既存の地盤改良工法である「ジェットグラウト工法」JG1 号の硬化材 1 m<sup>3</sup>当たりの標準配合（セメント 760kg，混和剤 12kg，水 750ℓ）<sup>5)</sup>を参考に，同じ配合割合のセメントミルク（早強セメント 425.6kg，混和剤 6.72kg，水 420ℓ）を割増 1.0 倍の配合として，改良体に必要な強度に応じて割増倍率を設定している．超高压地盤改良材 1 m<sup>3</sup>は，セメントミルク 560ℓと珪酸 Na 溶液 440ℓで構成され，セメントミルクの割増 1.6 倍は，早強セメントと混和剤をそれぞれ 1.6 倍に増量し，水と合せて 560ℓとなる配合であり，D0-Jet 工法の標準的な配合として設定している．

※2：洗浄用ポリマー溶液の使用量は，1min 当りを示す．

### 3-6-2-4 地盤改良範囲の確認

#### 1) 実験概要

地盤改良範囲の確認は，造成された改良体の出来形寸法を計測し，D0-Jet 工法の「技術資料（適用口径 1500mm 以上）」（以下「技術資料」と呼ぶ）に記載されている造成有効形状を基として作成された実験計画との整合性を確認する．また，従来口径（1500mm 以上）と同様の地盤改良体造成ができるか確認する．改良体の確認状況を写真 3-7 に示す．なお，改良体の着色は，セメントが混合していることを確認するために実施したフェノールフタレイン反応試験によるものである．



写真 3-7 改良体の出来形確認状況

## 2) 実験結果

改良体の計測結果を写真 3-8～3-11, 図 3-15～3-19 および表 3-17 に示す.

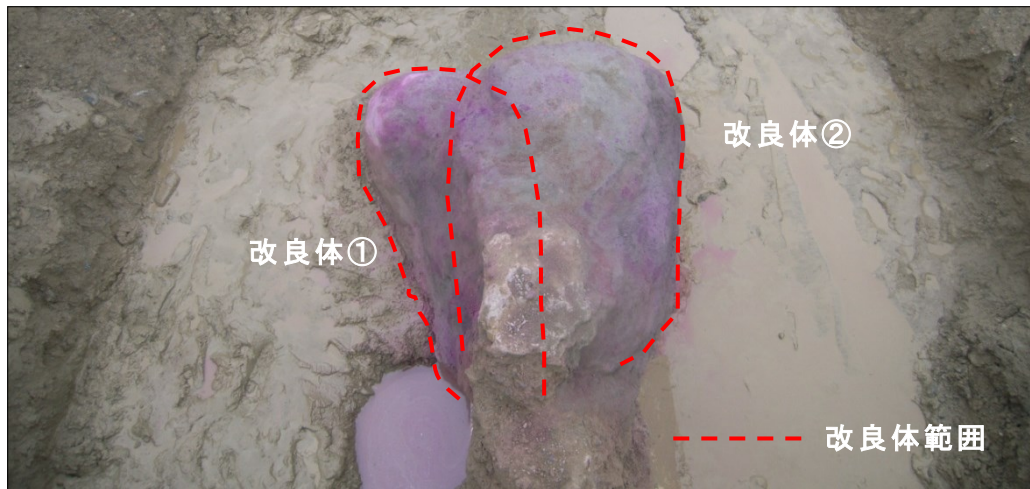


写真 3-8 改良体出来形確認 (平面写真)

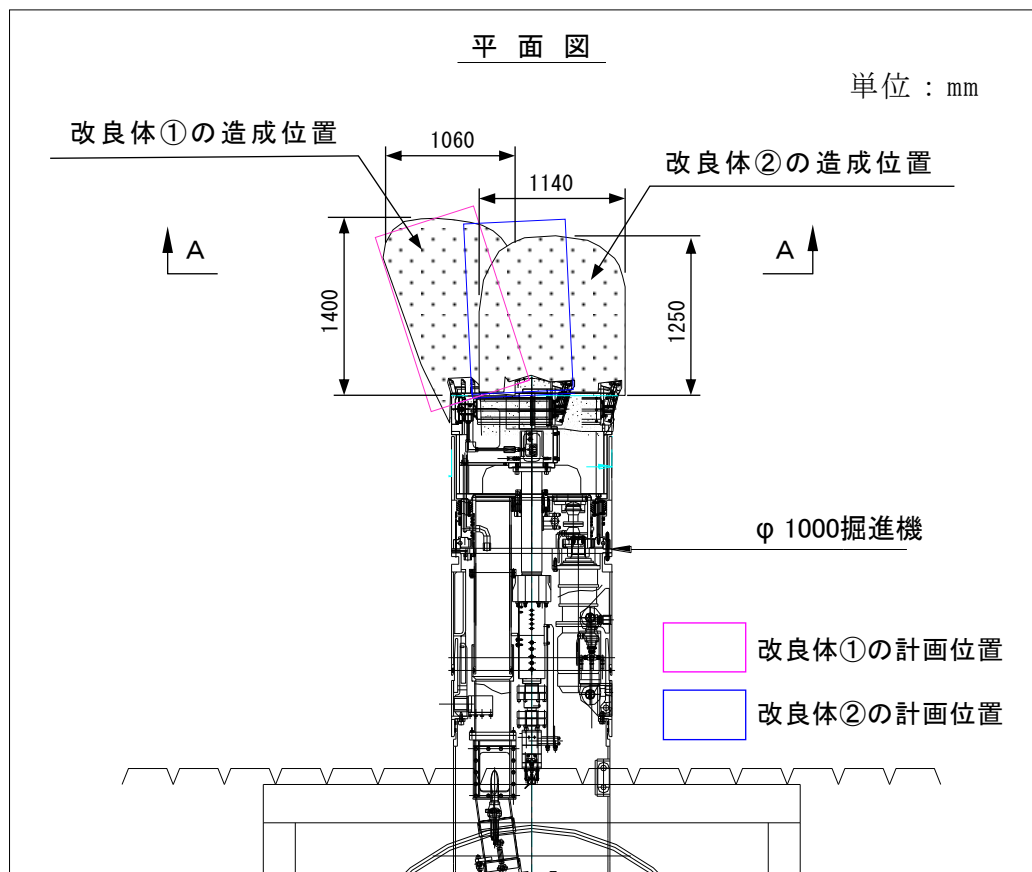


図 3-15 改良体出来形確認 (平面図)



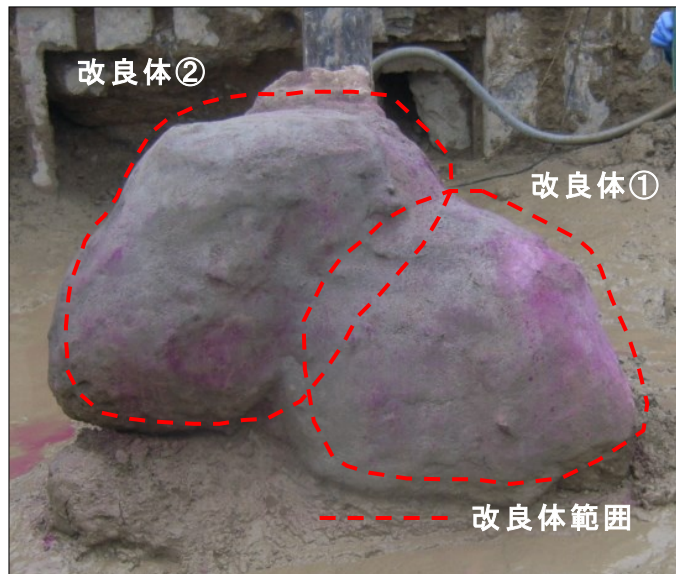


写真 3-9 改良体出来形確認（正面写真）

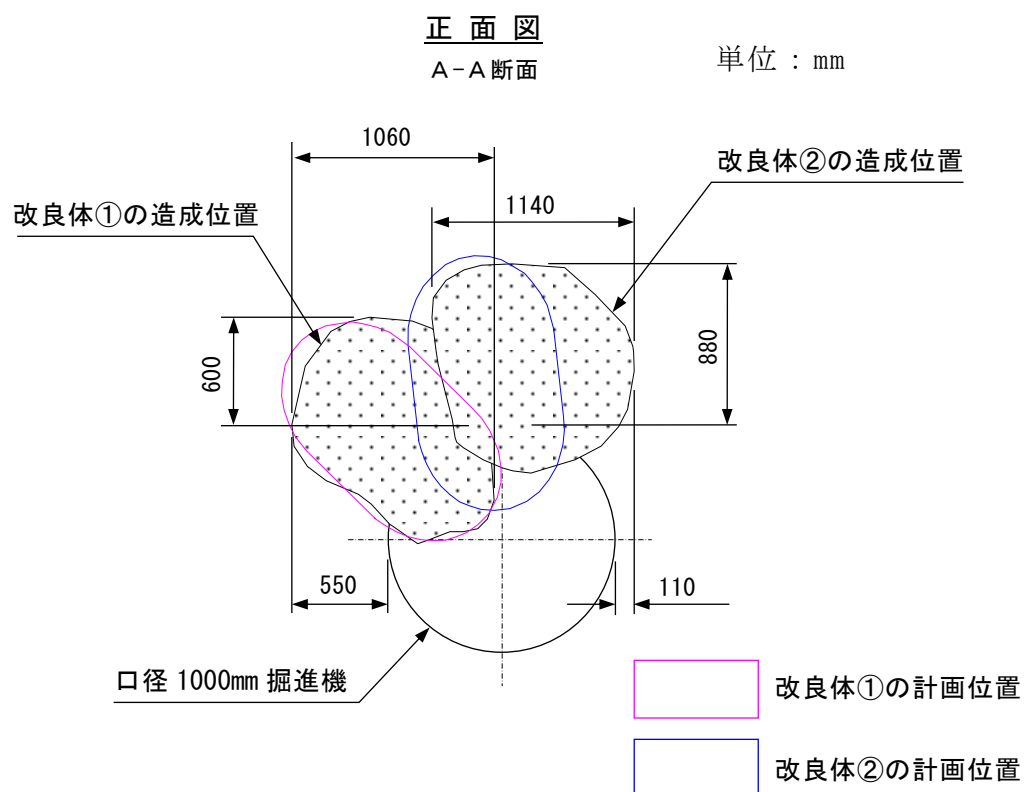


図 3-16 改良体出来形確認（正面図）



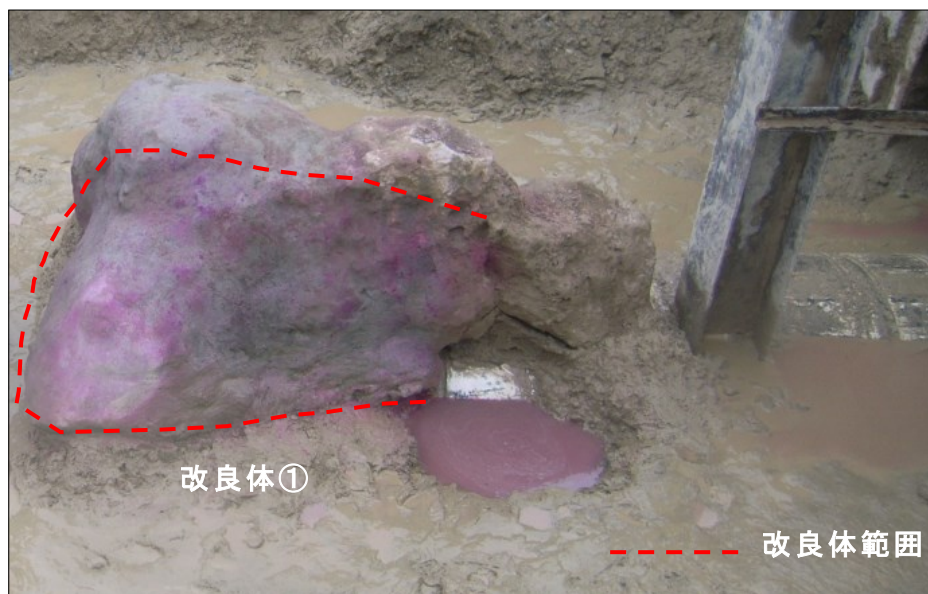


写真 3-10 改良体出来形確認（改良体①側面写真）

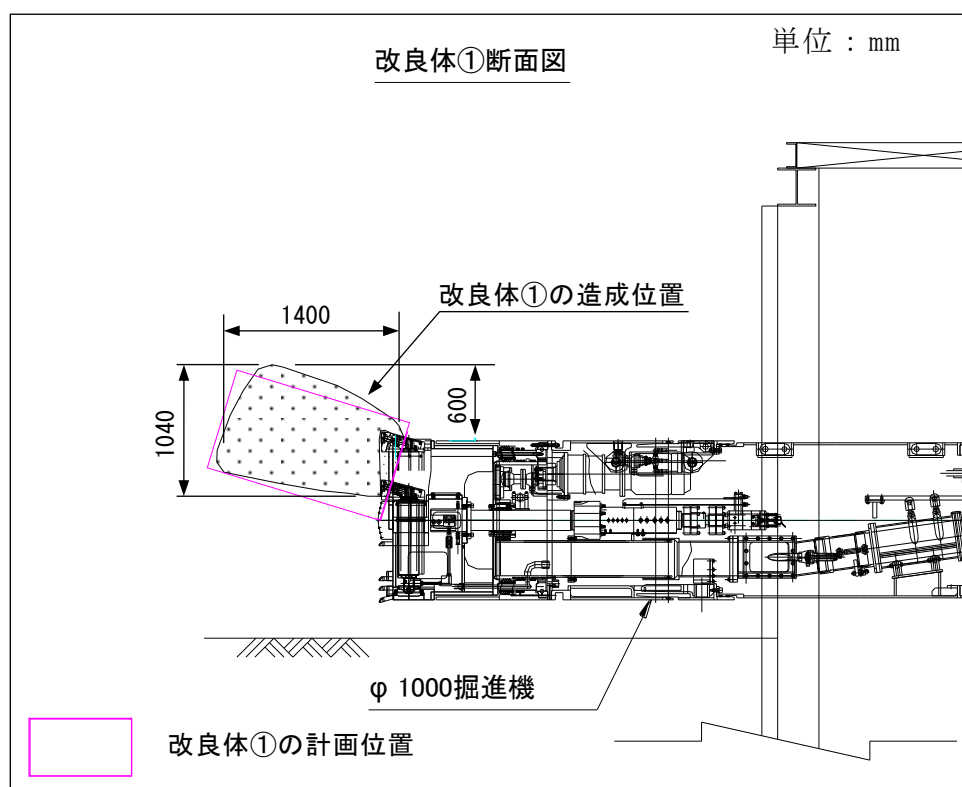


図 3-17 改良体出来形確認（改良体①断面図）



写真 3-11 改良体出来形確認（改良体②側面写真）

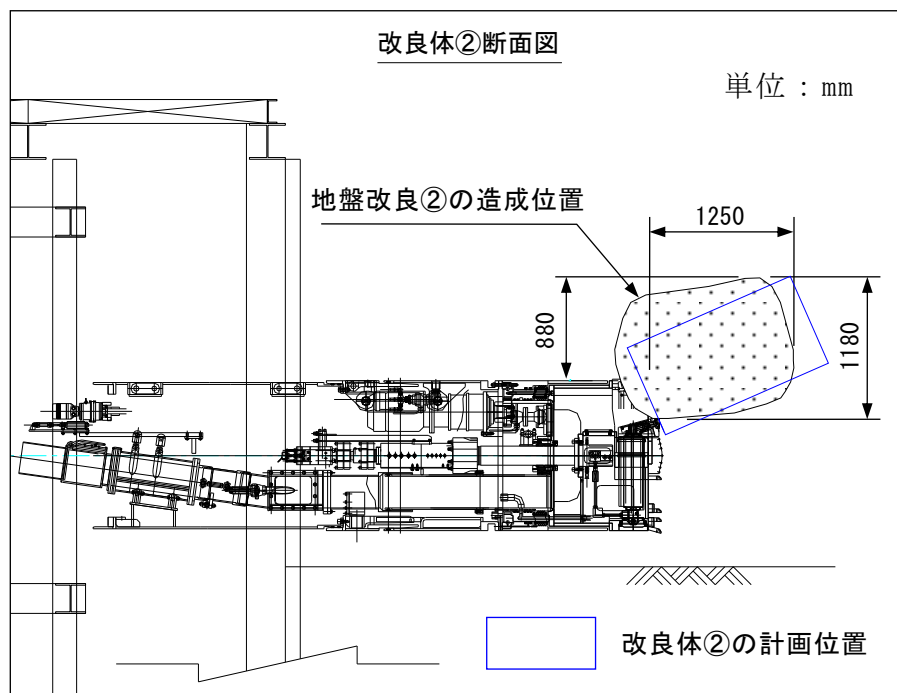


図 3-18 改良体出来形確認（改良体②断面図）

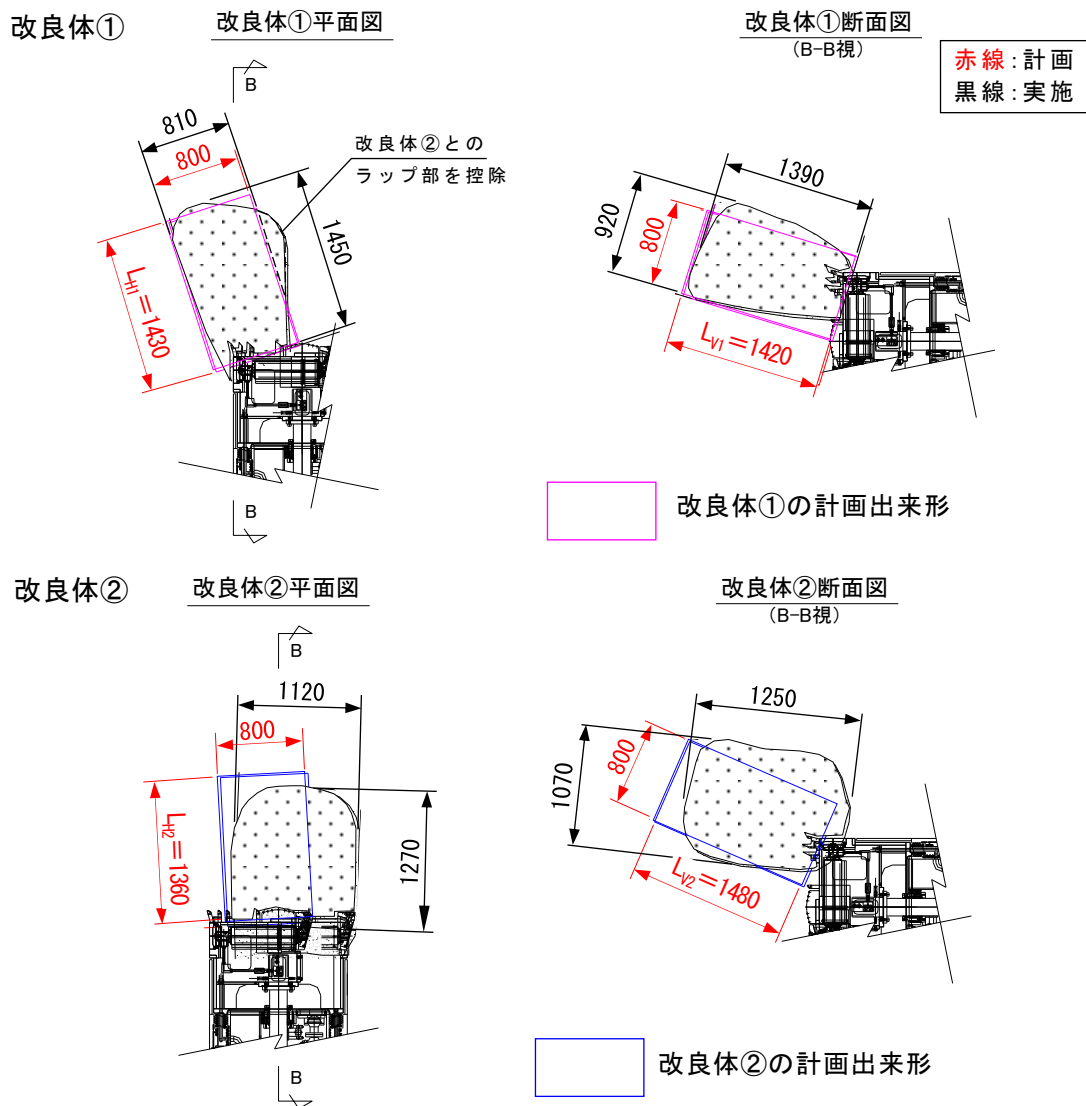
表 3-17 改良体の寸法（単位：mm）

	改良体①	改良体②
L（長さ）	1400	1250
W（幅）	1060	1140
H（高さ）	1040	1180

### 3) 改良体出来形と計画範囲の比較

「技術資料」に示す造成有効形状（長さ 1500mm，断面  $\phi 800$ mm）を計画出来形の基準値として，改良体出来形との比較を図 3-19 および表 3-18 に示す。

単位：mm



※  $L_H$ ， $L_V$  は計画出来形を平面及び側面に投影した長さで，以下の算出方法によった。ただし，図の寸法は CAD で作成しているため，算出した寸法と 10～15mm 程度の誤差を含んでいる。

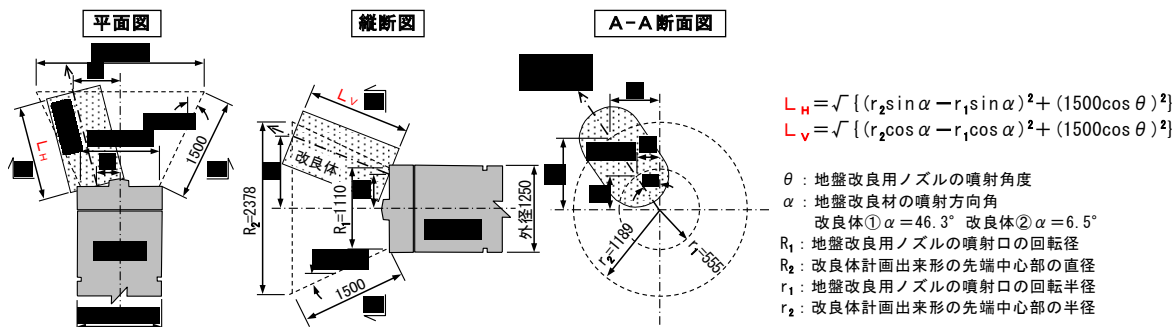


図 3-19 改良体出来形と計画範囲との比較

表 3-18 改良体寸法と計画寸法との比較

(単位：mm)

	改良体①		改良体②	
	計画値	実測値	計画値	実測値
L1 (平面長さ)	1430	1450	1360	1270
L2 (断面長さ)	1420	1390	1480	1250
W (幅)	800	810	800	1120
H (高さ)	800	920	800	1070

### 3-6-2-5 実験結果についての考察

#### 1) 改良体出来形について

改良体①は、幅、高さについては計画値と同等以上の出来形となった。長さについては、計画より若干下回る結果となったが、改良範囲および改良体出来形寸法とも計画と同等の改良体を造成することができた。

改良体②は、改良体①と同様に、幅、高さについては計画値と同等以上の出来形となったが、長さが計画値を下回り、改良範囲も計画とは異なる位置に確認された。これについては試験地盤の造成から3～4日後の施工だったことから、掘進機前方に比べて締固め度が低い掘進機周辺に噴射材が廻り込み、幅が広い改良体が造成され、長さが短くかつ、改良範囲も計画と異なる結果になったと考えられる。

#### 2) まとめ

今回の実験では、掘進機設置、H形鋼設置後に試験地盤埋め戻しを行い、実験を実施したが、試験地盤の造成直後（3～4日後）の施工だったことからH形鋼周辺および掘進機周辺にも改良材が廻り易い状況が確認された。今後、同様の実験を行う場合は、試験地盤の造成後にH形鋼の打設と掘進機を発進するか、または乱していない地山に立坑を築造して掘進機を発進するなどにより、十分に締め固まった地盤で実験を行う必要があると考える。

ただし、本実験結果として、改良体は計画した位置に概ね計画値と同程度の出来形となっていることから、上記理由を考慮すれば、小・中口径の掘進機においても従来口径（1500mm以上）と同様に改良体の造成が可能であると考えられる。

### 3-6-2-6 地盤改良強度の確認

#### 1) 実験概要

地盤改良の強度確認は、造成された改良体をサンプリングし、一軸圧縮強度

試験にて改良体の強度確認を行い、「技術資料」に記載の参考値との整合性を確認し、造成された改良体が従来口径（1500mm 以上）と同様の強度を有するか検証する。

改良体の①および②を A（根元部）、B（中間部）、C（先端部）に区分し、各々から採取した 3 本のコアについて一軸圧縮強度試験を行い、強度を確認する。改良体の区分を写真 3-12、写真 3-13 に示す。



写真 3-12 改良体①の区分



写真 3-13 改良体②の区分

## 2) 実験結果

改良体の一軸圧縮強度試験結果を表 3-19 に示す。

表 3-19 改良体の一軸圧縮強度試験結果（平均値）（単位  $\text{kN/m}^2$ ）

養生日	7 日 以 上		
試料 No	根元部	中間部	先端部
計画値	2070	2070	2070
改良体①	2857	2828	2534
改良体②	2239	2200	2198

## 3) 実験結果についての考察

各改良体を根元部、中間部、先端部に分けてみると、改良体①、②とも根元から先端に行くにつれて若干改良体強度が低下していく傾向がある。これについては、噴射位置に近い部分の方が、噴流による改良材の置換効率が高いためと考える。

造成した改良体の強度は、「技術資料」に記載の「セメントの割増 1.6 倍配合の材齢 7 日一軸圧縮強度の参考値  $2070\text{kN/m}^2$ 」を上回っていることから、従来口径（1500 mm 以上）と同様の強度を有した改良体を造成出来ることが確認できた。よって、小・中口径の掘進機においても、「技術資料」に記載されて

いる地盤改良強度を得ることが可能である。

3-6-2-7 地表面の変位量の確認

超高圧地盤改良に伴う地表面の変位量は、最終計測値（改良②噴射後）で最大 3mm の沈下量であり、計測全体の変位量は試験地盤全体で+1mm～-3mm と少なく、「技術資料」に記録されている過去の実工事とほぼ同じ変位量を示していることから噴射による影響はないものとする。また試験地盤は、埋戻し造成後 3～4 日後の地盤であることを考慮すると地盤改良による周辺地盤に与える影響は微小であると言える。図 3-20 に地表面の変位計測位置図、表 3-20 に地表面の変位計測結果を示す。

表 3-20 地表面の変位計測結果（mm）

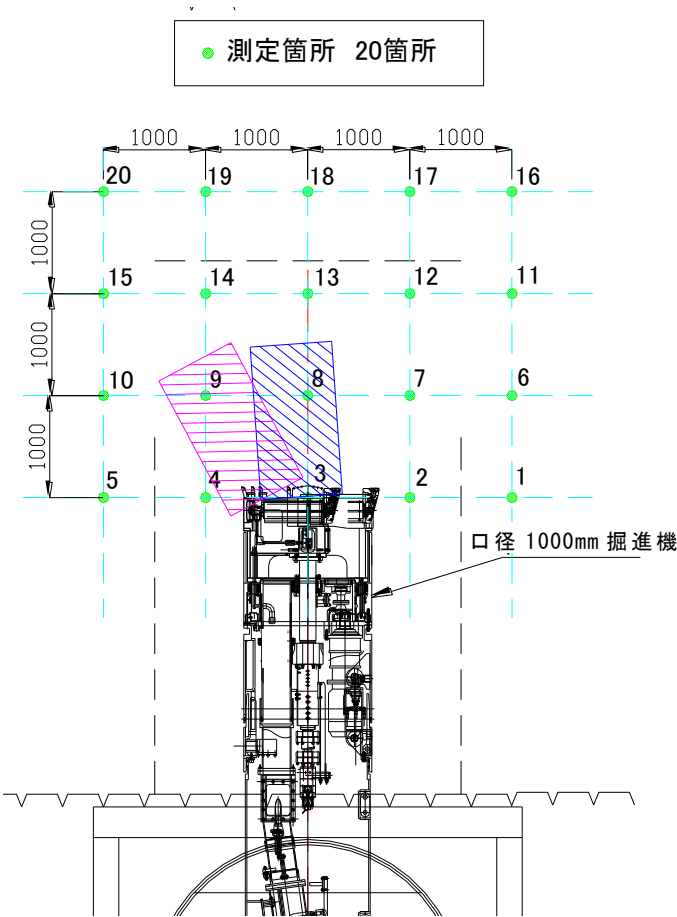


図 3-20 地表面の変位計測位置図

測点 No.		改良①前 ＼ 改良①後 までの 変位量	改良①前 ＼ 改良②後 までの 変位量
1	噴射地点	1	1
2		1	0
3		-2	-2
4		-2	-2
5		1	0
6	噴射位置から 法線方向に 1.0m 地点	1	-1
7		0	0
8		-2	-3
9		-1	-2
10		-1	-1
11	噴射位置から 法線方向に 2.0m 地点	0	-1
12		0	0
13		-1	-2
14		1	-1
15		1	0
16	噴射位置から 法線方向に 3.0m 地点	0	-1
17		1	0
18		1	1
19		1	-1
20		0	0

### 3-6-2-8 噴射材料の打込み量および排泥量の確認

#### 1) 実験概要

地盤改良における各種噴射材料の打込み量および排泥量の計測を実施し、計画との比較を行い、その整合性と噴射量と排泥量の収支バランスを確認する。その結果を基に小・中口径の掘進機においても従来口径（1500mm 以上）と同様な収支バランス管理を行うことで施工上問題ないかを確認する。

表 3-21 地盤改良噴射結果

	単位	改良①	改良②	実施合計	計画数量 <sup>(※1)</sup>	増 減
噴射圧力	MPa	245				
噴射時間	min	17.1	17.1	34.2	31.2	+3.0
加泥材注入量	m <sup>3</sup>	1.380		1.380	1.360	+0.020
ジェット水噴射量	m <sup>3</sup>	0.910	0.910	1.820	1.659	+0.161
セメントミルク噴射量	m <sup>3</sup>	1.161	1.159	2.320	2.111	+0.209
打込み量 (ジェット水+セメントミルク)	m <sup>3</sup>	2.071	2.069	4.140	3.770	+0.370
アブレシブライン洗浄量	m <sup>3</sup>	0.050	0.050	0.100	0.100	±0
ポリマー洗浄量	m <sup>3</sup>	0.052		0.052	0.050	+0.002
排泥量	m <sup>3</sup>	2.011	2.003	4.014	3.770	+0.244
噴射量と排泥量 の収支バランス (排泥量/打込み量)	%	97.1	96.8	97.0	100	-3.0

(※1)D0-Jet 工法「技術資料」,「積算資料」<sup>6)</sup>を基に算出した。

#### 2) 実験結果

##### ① 打込み量について

噴射時間, 加泥材注入量, 改良材噴射量(ジェット水噴射量, セメントミルク噴射量), ポリマー洗浄量, 排泥量の計画数量と実施数量に差異はなく, 計画どおりの打込み量となった。

##### ② 排泥量について

排泥量は噴射量に対して約 97%とほぼ同量であり, 収支バランスが確保できた。

##### ④ 実施結果に対する評価

本工法「技術資料」では「排泥量は, 噴射量と一致または噴射量以下になる



ように制御する」と記載されている。実施打ち込み量と排泥量はほぼ同等であり、「技術資料」で設定している数値とおおむね整合していることから、打ち込み量と排泥量の収支バランス管理については従来口径（口径 1500 mm 以上）と同様に行うことで問題はないことが確認できた。

### 3-6-2-9 排泥の性状の確認

排泥の比重、粘性、温度の各性状とも計測値が一定となる時間が噴射開始から 12～14 分程度となり、この時間で改良体 1 本当たりの計画改良範囲を改良材と置換出来ていると考えられる。また、「技術資料」では、より完全に改良範囲の置換を確保するため、約 1 割増となる計画噴射時間（15.6 分）を設定している。上述の改良体の出来形と強度が計画と同等の結果を得たことから、噴射時間の割増は妥当であったと考える。排泥の比重測定結果を表 3-22 および図 3-21 に、排泥の粘性測定結果を表 3-23 および図 3-22 に、排泥温度の測定結果を表 3-24 および図 3-23 に示す。

表 3-22 排泥の比重測定結果

噴射時間	2 分	4 分	6 分	8 分	10 分	12 分	14 分	16 分
改良①	1.56	1.63	1.53	1.60	1.58	1.53	1.50	1.49
改良②	1.57	1.55	1.56	1.59	1.54	1.50	1.49	1.51

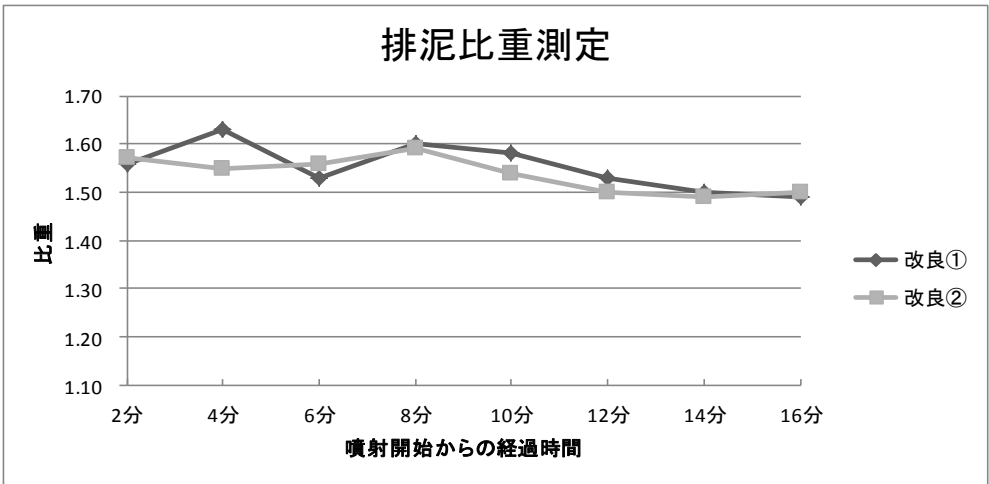


図 3-21 排泥の比重測定結果



表 3-23 排泥の粘性測定結果

(dpa・s)

噴射時間	2 分	4 分	6 分	8 分	10 分	12 分	14 分	16 分
改良①	11.0	14.0	18.0	20.0	19.0	18.0	22.0	24.0
改良②	12.0	13.0	16.0	18.0	21.0	17.0	24.0	22.0

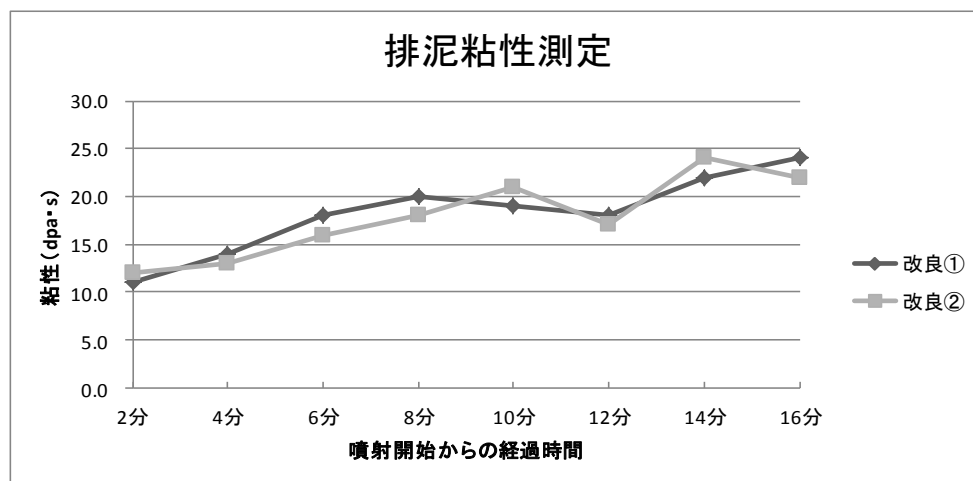


図 3-22 排泥の粘性測定結果

表 3-24 排泥温度の測定結果

(℃)

噴射時間	2 分	4 分	6 分	8 分	10 分	12 分	14 分	16 分
改良①	22.0	22.0	25.0	34.0	40.0	43.0	44.0	44.0
改良②	23.0	25.0	28.0	36.0	39.0	41.0	45.0	44.0

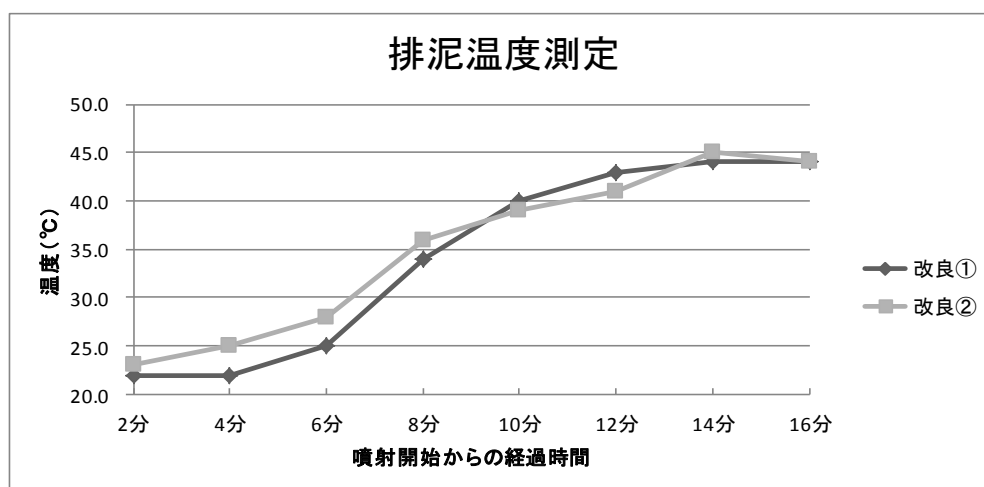


図 3-23 排泥温度の測定結果

### 3-6-2-10 切羽圧力の確認

D0-Jet 工法における地盤改良材の噴射中における切羽圧力は、下限値を地下水圧+0.01MPa、上限値を地下水圧+0.02MPa の範囲で管理することを標準としていた。これは、泥濃式推進工法の掘進時の一般的な圧力管理値<sup>7)</sup>（下限値：地下水圧+0.02MPa、上限値：地下水圧+0.05~0.06MPa）に対して、超高压ジェット噴射による切羽の圧力上昇を考慮して設定していた。しかし、工事中の地表面および近接構造物の変位計測などで超高压ジェットによる影響が無いことが確認されてきたことに伴い、現在では泥濃式推進工法の掘進時の一般的な圧力管理で施工することを標準としている。

本実験では、地下水位が低い状況にあったため、チャンバーから切羽までの埋戻し部分に泥土圧を与えて切羽付近を飽和状態にした場合の土圧計の読みを切羽土圧の下限値として、噴射中の圧力管理の妥当性を確認した。

本実験に用いた切羽圧力の管理値を以下に示す

下限値：0.005MPa（地盤改良材噴射前の掘進機の土圧計の読み値）

上限値：0.015MPa（下限値+0.010MPa）

地盤改良材の噴射中の切羽土圧の測定結果を表 3-25 に示す。地盤改良①、②とも噴射中の切羽土圧は、管理値内であることが確認できた。また、地表面から改良材の逸水が無いことを確認した。これらのことから、従来口径(1500mm 以上)と同様に切羽圧力の管理値を設定し、土圧管理を行うことで支障はないと考える。

表 3-25 切羽土圧の測定結果

噴射番号	切羽土圧 (MPa)	
	最小	最大
改良①噴射中	0.005	0.014
改良②噴射中	0.006	0.015

### 3-6-2-11 超高压地盤改良の作業性および安全性の確認

#### 1) 作業性について

地盤改良材の練混ぜ等に使用する機材は地上に設置して作業を行うため、従来口径（1500mm 以上）と比較して作業性は変わらないが、操作台車は推進管内に設置して地盤改良を行う必要がある。

したがって、小・中口径化による若干の作業性の低下は想定されるが、前方

探査同様，問題のない程度と考える．

## 2) 安全性について

地盤改良材の練混ぜ等に使用する機材は地上に設置して作業を行うため，従来口径（1500mm 以上）と比較して安全性は変わらない．推進管内で掘進機操作，切羽作業がある場合は，作業スペースが狭いため頭上や足元に注意する必要があるが，小・中口径化に伴って極端に安全性が低下することはないと考える．

したがって，従来口径（1500mm 以上）と比較して注意を要する点は増加するが，地盤改良時の安全性は従来口径と相違なく問題ないとする．

### 3-6-3 切断および切断片除去技術の評価

#### 3-6-3-1 切断および切断片除去実験の内容および目的

前方探査後，切断ノズルより切断材を超高圧（245MPa）で噴射し，支障物（H 形鋼（H-300×300×10×15））の切断を行い，その際の地表面の変位量，噴射材料の打込み量および排泥量，切羽圧力の確認を行う．さらに，口径 1000mm の掘進機で従来と同様に支障物切断の機能を満たす動作が行えるかを検証する．

実験は，表 3-26 に示す確認項目，測定箇所，頻度，方法にて実施した．試験地盤の土質条件等は，前述の超高圧地盤改良の実験条件と同様のもとで実施した．

表 3-26 確認項目一覧

	項目	測定箇所	頻度	方法
1	地表面の変位	立坑地表面 (21 測点)	地盤改良の 施工前・施工後	レベル測量
2	打込み量	作液プラント	切断材の噴射後	作液量測定
3	排泥量	排泥ピット	切断材の噴射後	排泥ピットの深さ測定
4	切羽圧力	切羽	切断材の噴射 前・噴射中	土圧計にて確認
5	切断片の取込み 状況(掘進機内)	掘進機内	掘進延長 0.7m, 1.0m, 1.73m 地点	排泥管支障物搬出口から 回収, 寸法測定
6	切断片の取込み 状況(チャンバ内)	カッターチャンバ内	試験地盤掘削中 切断片出現時	チャンバ内の出現位置確認, 寸法測定
7	切断片の未回収 状況	試験地盤内	試験地盤掘削中 切断片出現時	地盤内の出現位置確認, 寸法測定
8	切断における 作業性・安全性	掘進機内	切断の準備・ 施工・片づけ時	掘進機内の移動, 噴射材供 給ラインの接続切替え
9	切断片取込みの 作業性・安全性	掘進機内	切断片の掘進機 内回収時	掘進機内の移動, 支障物搬出 口蓋の開閉, 切断片の回収

### 3-6-3-2 切断実験の概要

図 3-24 に示すように試験地盤内に支障物 (H 形鋼 (H-300×300×10×15)) を設置し, 支障物の切断を行った. 切断計画図を図 3-25 に示す. また, ノズルは図 3-26 に示すように, 外周切断ノズルおよび内周切断ノズルを使用した.

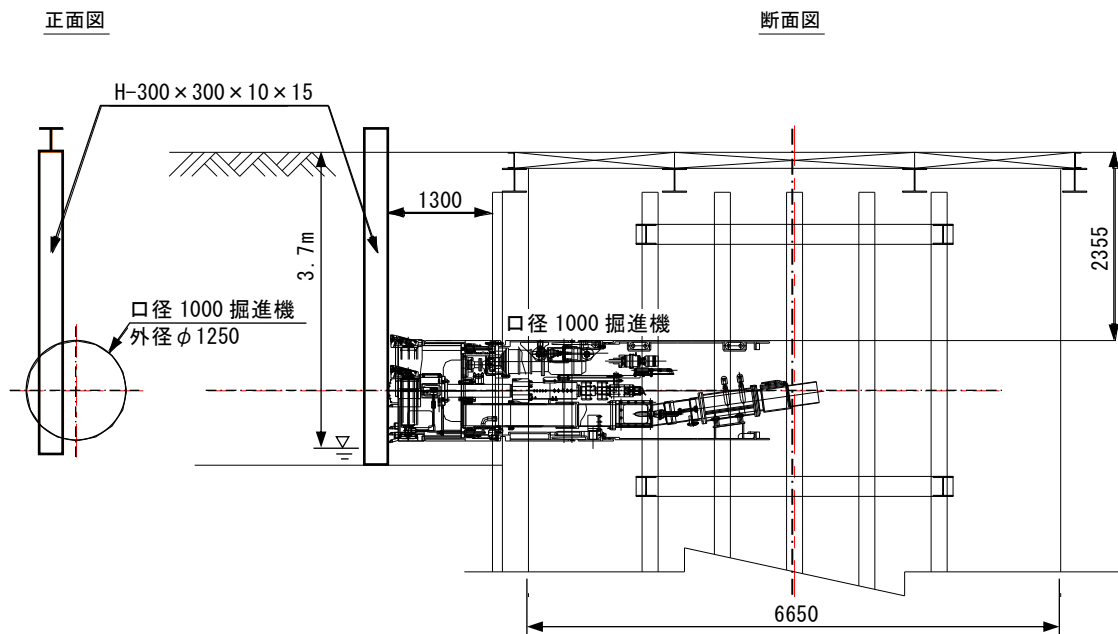


図 3-24 切断実験概要図（正面図，断面図）

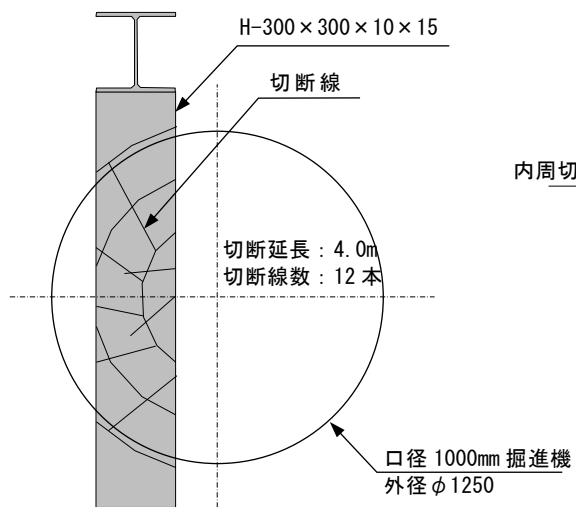


図 3-25 切断計画図

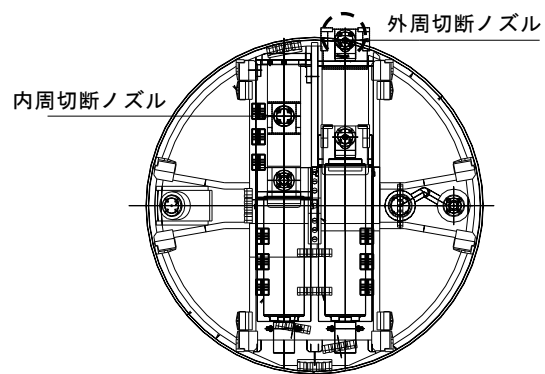


図 3-26 切断用ノズル配置図

### 3-6-3-3 実験計画の変更

本実験機は従来口径（1500mm 以上）と同様に，外周切断用ノズルに水平より外向きに角度（本実験機は  $15^{\circ}$  ）を付けて切断材を噴射し，支障物と掘進機の間クリアランスを設けて掘進するように設計している．

外周切断ノズルがカッターヘッドの中心軸上で移動する従来口径の場合は，中心から上下左右に放射状および同芯円状に支障物を切断できるが，口径 1000～1350mm の掘進機では外周切断用ノズルを中心軸から外側に移動したことにより，未切断部が生じることが想定された．このため，H 形鋼の埋戻し前にノズルから切断材を低圧で噴射し，実際の切断位置と切断計画との差異が生じる部分について，切断計画を変更した．

図 3-27 に変更前と変更後の切断計画および変更箇所を示す．

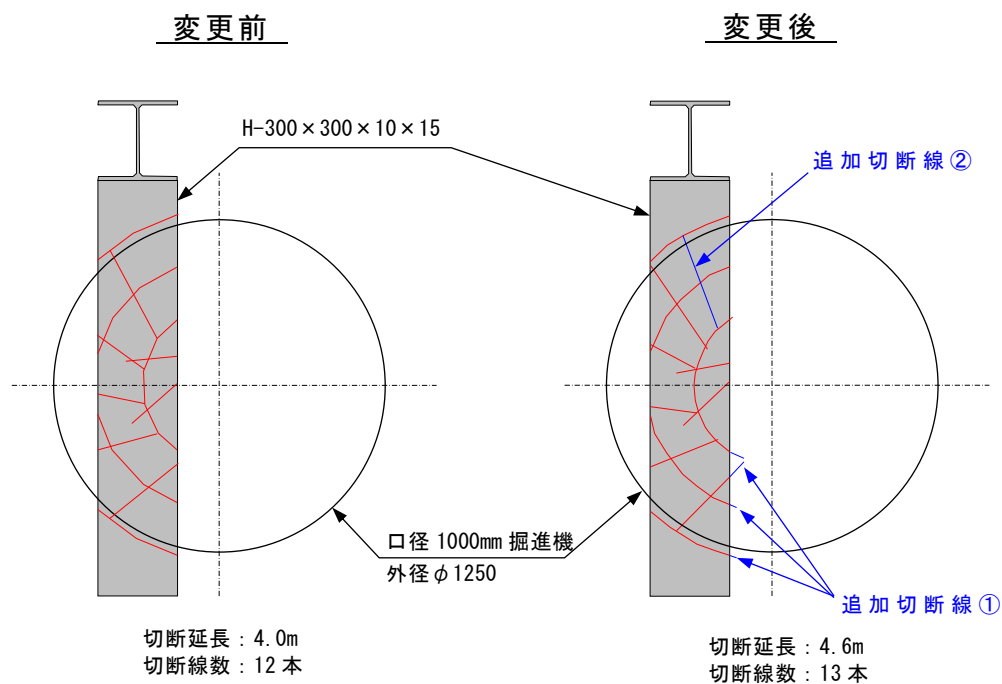


図 3-27 切断計画変更概要図

外周切断ノズルは角度付きのため，H 形鋼の手前側フランジと奥側のフランジで切断位置が異なるため，奥側のフランジに未切断部分が残る．そのため奥側のフランジを確実に切断するように追加切断線①を入れた．また，切断位置の変更に伴い切断片が大きくなるため，法線方向の切断線を全体的に移動させ，追加切断線②を入れた．

切断位置および切断順序を図 3-28 に，噴射時間を表 3-27 に示す．

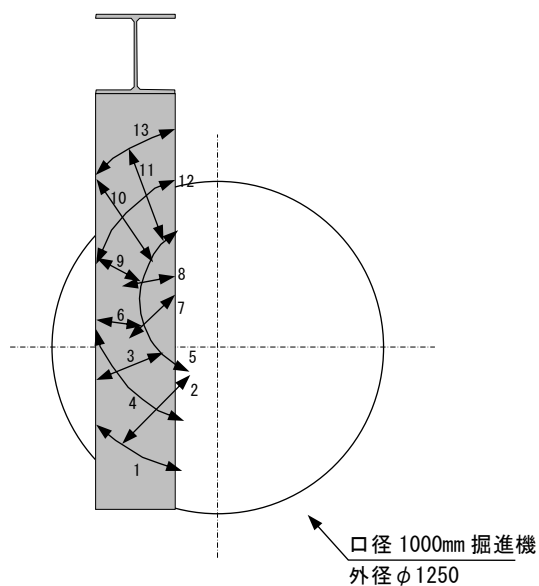


図 3-28 切断位置および切断順序図

表 3-27 切断工実施結果

噴射回数	切断番号	開始時刻	終了時刻	切断時間
1 回目	1	8 : 50	10 : 13	1 : 23
	2	10 : 43	12 : 04	1 : 21
	3	13 : 36	14 : 35	0 : 59
2 回目	4	8 : 51	10 : 43	1 : 52
	5	12 : 15	14 : 40	2 : 25
	6	15 : 11	15 : 52	0 : 41
3 回目	7	8 : 45	9 : 39	0 : 54
	8	10 : 09	10 : 56	0 : 47
	9	12 : 27	13 : 09	0 : 42
	10	13 : 40	15 : 00	1 : 20
4 回目	11	8 : 45	10 : 08	1 : 23
	12	10 : 39	12 : 24	1 : 45
	13	13 : 52	15 : 12	1 : 20

#### 3-6-3-4 使用材料

切断で使用する材料の配合を表 3-28 に示す。

表 3-28 切断工使用材料

切断材	アブレシブスラリー (30 ℓ当り)	水	研磨材	ポリマー	硬化剤
		6.5 ℓ	32.0 kg	6.5 ℓ	25.0 kg
	超高压ジェット水 (200 ℓ当り)	水	珪酸 Na	—	
		170 ℓ	30 ℓ		
加泥材	加泥材	水	粉末粘土	増粘材	目詰材
		891.6 ℓ	240 kg	1.8 kg	10.0 kg
洗浄材	ポリマー溶液 (1min 当り)	水	ポリマー	—	
		5.0 ℓ	5.0 ℓ		

3-6-3-5 地表面の変位量の確認

地表面の変位計測は、切断時の超高压ジェット水噴射による試験地盤への影響を把握するため、図 3-29 に示すNo.1～21 の計測位置に杭を設置し、切断施工前と施工後における地表面の変位量を計測した。

「技術資料」には、過去の施工実績の参考として路面変位量+2 mm～-3 mm が記載されている。本実験の変位量は、「技術資料」に記載されている変位量の範囲内に収まっていることから、小・中口径の掘進機においても超高压ジェットによる変化はないものとする。表 3-29 に地表面の変位計測結果を示す。

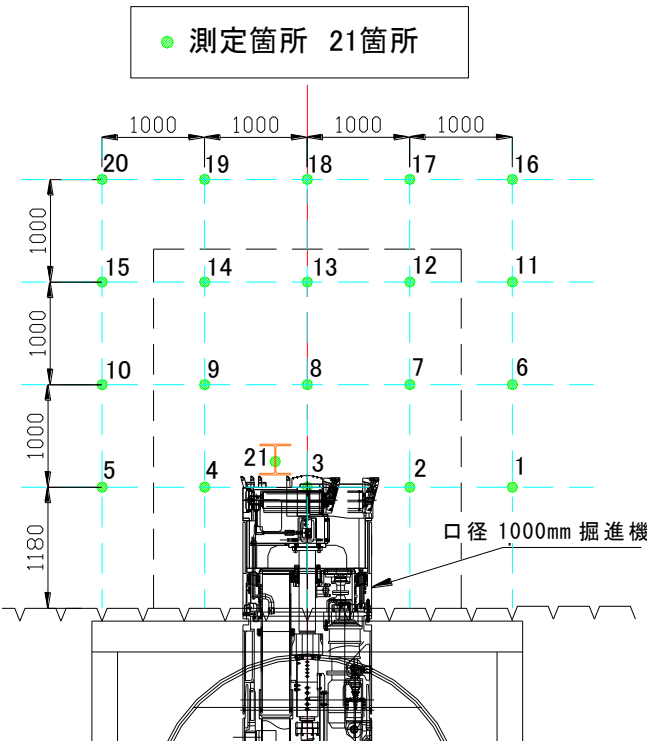


図 3-29 地表面の変位計測位置図

表 3-29 地表面の変位計測結果 (mm)

測点 No.		1 回目	2 回目	3 回目	4 回目
1	噴射地点	1	0	0	0
2		0	-1	0	1
3		-2	-1	-1	-3
4		-2	-1	0	-2
5		1	-1	-1	0
6	噴射位置から 法線方向に 1.0m 地点	-1	0	-1	-1
7		-1	-1	0	0
8		-2	0	-1	-3
9		1	-1	0	-1
10		-1	0	-1	-1
11	噴射位置から 法線方向に 2.0m 地点	0	-1	-1	-1
12		0	0	0	1
13		-1	-2	-1	-2
14		-1	-2	-1	0
15		-1	-1	-1	-1
16	噴射位置から 法線方向に 3.0m 地点	1	0	1	1
17		0	-1	0	-1
18		1	0	0	1
19		-1	-1	-1	-1
20		0	0	0	1
21	支障物位置	-2	-1	-2	-3



### 3-6-3-6 噴射材料の打込み量および排泥量の確認

#### 1) 実験概要

切断における各種噴射材料の打込み量および排泥量の計測を実施し、計画との比較を行い、その整合性と噴射量と排泥量の収支バランスを確認する。その結果を基に小・中口径の掘進機においても従来口径（1500mm 以上）と同様な収支バランス管理を行うことで施工上問題ないかを確認する。

切断における打込み総量，排泥総量を以下に示す。

表 3-30 切断噴射結果

	単位	1 回目	2 回目	3 回目	4 回目	実施 合計	計画 数量 <sup>(※1)</sup>	増減
噴射圧力	MPa	245						
噴射時間	min	223.6	297.9	222.0	266.3	1009.8	882.2	+127.6
加泥材 注入量	m <sup>3</sup>	0.690	0.705	0.698	0.694	2.787	2.720	+0.067
ジェット水 噴射量	m <sup>3</sup>	12.298	16.385	12.211	14.647	55.541	48.521	+7.020
スラリー 噴射量	m <sup>3</sup>	1.118	1.490	1.111	1.332	5.051	4.411	+0.640
打込量 (ジェット水 +スラリー)	m <sup>3</sup>	13.416	17.875	13.322	15.979	60.592	52.932	+7.660
ポリマー 洗浄量	m <sup>3</sup>	0.150	0.152	0.202	0.152	0.656	0.600	+0.056
排泥量	m <sup>3</sup>	13.161	17.446	12.922	15.468	58.997	52.932	+6.065
収支バランス (排泥量/ 打込量)	%	98.1	97.6	97.0	96.8	97.4	100	-2.6

(※1)D0-Jet 工法「技術資料」，「積算資料」<sup>6)</sup>を基に算出した。

#### 2) 実験結果

##### ① 打込み量について

「3-6-3-3 実験計画の変更」に示すとおり，切断線数，切断延長を増加して切断を行ったため，噴射時間，切断材の噴射量（ジェット水噴射量，スラリー噴射量），ポリマー洗浄量，排泥量は計画数量より大幅に上回る結果となった。

## ② 排泥量について

排泥量は噴射量に対して約 97%とほぼ同量であり，収支バランスが確保できた．

## ③ 実施結果に対する評価

「技術資料」には，「排泥量は，噴射量と一致または噴射量以下になるように制御する」と記載されている．実施打ち込み量と排泥量はほぼ同等であり，「技術資料」で設定している数値とおおむね整合していることから，打ち込み量と排泥量の収支バランス管理については従来口径（1500mm 以上）と同様に行うことで問題はないことが確認できた．

### 3-6-3-7 切羽圧力の確認

切断における切羽圧力管理の考え方は，超高圧地盤改良時の圧力管理と同様である．本実験においても掘進機に装備している土圧計により切断材の噴射前の切羽土圧を下限值として噴射中の圧力管理の妥当性を確認する．

本実験に用いた切羽圧力の管理値を以下に示す．

下限值：0.006MPa（切断材噴射前の掘進機の土圧計の読み値）

上限値：0.016MPa（下限值＋0.010MPa）

切断材の噴射中の切羽土圧の測定結果を表 3-31 に示す．切断 1 回目から 4 回目までの切断材の噴射中の切羽土圧は，管理値内であることが確認できた．また，地表面から改良材の逸水が無いことを確認した．これらのことから，従来口径（1500mm 以上）と同様に切羽圧力の管理値を設定し，土圧管理を行うことで支障はないと考える．

表 3-31 切羽土圧の測定結果

	切羽土圧 (MPa)	
	最小	～ 最大
1 回目	0.006	0.015
2 回目	0.006	0.014
3 回目	0.007	0.014
4 回目	0.006	0.015

### 3-6-3-8 切断片の掘進機内への取込状況の確認

#### 1) 確認内容

支障物の切断完了後に掘進し、掘進機内に取り込んだ切断片の数、寸法および切断片の回収率を確認する。

具体的には、切断完了後、掘進機を初期位置から 0.7m, 1.0m, 1.73m 掘進した地点でそれぞれ支障物搬出口より切断片の取込状況を確認する。また、掘進機周辺を掘削し、チャンバ内および掘進機周辺の切断片の分布および切断片の回収率を確認する。



写真 3-14 切断片の取出し状況

#### 2) 確認結果

各確認地点での切断片の取込み結果を表 3-32 に示す。掘進機内に取り込んだ切断片の状況を写真 3-15 に示す。

表 3-32 切断片の取込み結果

初期位置からの掘進延長	取込んだ切断片の数
0.7m	0
1.0m	1
1.73m	0



写真 3-15 切断片の状況

初期位置からの掘進延長が 1.0m 地点で、排泥管内に切断片が 1 つ回収された。支障物排出口から回収した切断片の寸法は 207×282×146mm であり、排泥口の寸法（幅 376mm, 高さ 265mm）よりも小さいことが確認できた。その後、

支障物搬出口の蓋を閉塞し，最終確認地点の 1.73m まで掘進したが，切断片は確認されなかった．



写真 3-16 切断片の寸法確認状況

### 3-6-3-9 切断片のチャンバ内への取込状況の確認

#### 1) 確認内容

切断片の取込掘進完了後に試験地盤を掘削し，掘進機のチャンバ内に取り込んだ切断片の数，寸法を確認する．また，掘進機内とチャンバ内に取り込んだ切断片を合わせて，全切断片数に対する切断片の回収率を整理する．

#### 2) 確認結果

試験地盤を掘削した結果，チャンバ内からは切断片が 6 個確認された．チャンバ内から回収した切断片の寸法確認状況を図 3-30 および写真 3-17，3-18 に，切断片の寸法を表 3-33 に示す．

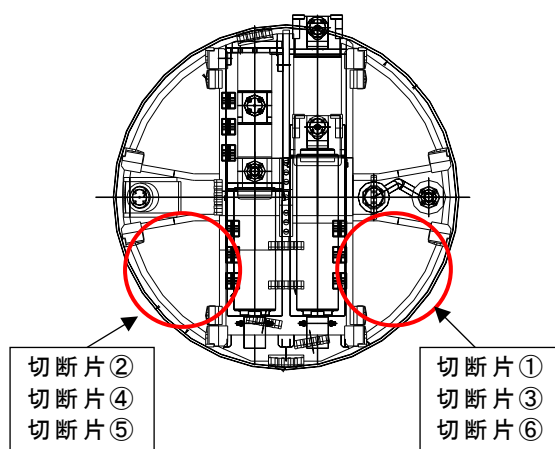


図 3-30 チャンバ内切断片確認



写真 3-17 チャンバ内切断片確認

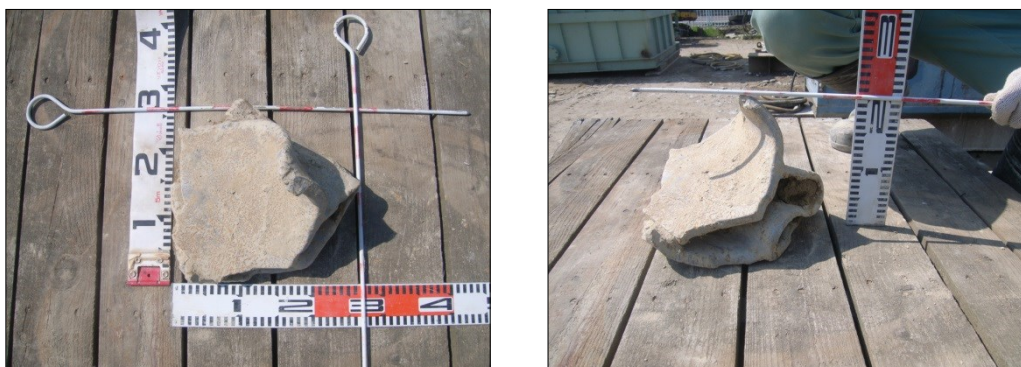


写真 3-18 チャンバ内に取込まれた切断片 No. ⑤の寸法確認状況

表 3-33 チャンバ内に取込まれた切断片の寸法 (mm)

切断 No.	縦	横	高さ
①	262	165	40
②	200	160	30
③	199	122	27
④	172	193	168
⑤	262	270	201
⑥	230	247	166

### 3) 切断片の回収率

本実験における切断計画図より，全切断片の数は 23 個となり，そのうち 1 個が掘進機排泥管内，6 個がチャンバ内で確認された．

以上の結果から，切断片の回収率は，

$$\begin{aligned}
 \text{切断片回収率} &= (\text{排泥管内切断片数} + \text{チャンバ内切断片数}) \\
 &\quad / \text{全切断片数} \times 100 \\
 &= (1+6) / 23 \times 100 \\
 &= 30.4\%
 \end{aligned}$$

となり，約 3 割の回収率となった．

従来の施工では，掘進機の排泥口の寸法ごとに取り込み可能な切断片の寸法を詳細に計画しているが，地盤の土質条件や切羽圧力，支障物の位置等により切断から取込みまでの動きがその都度異なり機械的な制御が困難な面もある．実施工での回収率の向上のためには，支障物切断後の掘進距離を長くとることなどが考えられる．

### 3-6-3-10 掘進機周辺の切断片の確認

掘進機周辺の試験地盤を掘削し、チャンバ内に取り込まれなかった切断片を確認した。切断片が確認された位置を測定し、分布図を作成した。図 3-32 に示す切断片の分布図からは、掘進機を正面から見て掘進機の左側と下側に集中して切断片が確認された。

これは掘進機のカッターヘッドを右回りに回転して掘進したため、切断片が掘進機正面から見て左側に集中していたものと考えられる。

切断片の取込みが少なかった原因には、試験地盤が造成から 5～6 日後で締め固め度が低く、切断片が地山側に押し出されやすかったこと、切断片取込みのための掘進距離が短く、チャンバ内に取り込んだ切断片を排泥管内に取り込むほどの掘削土の移動量（排土量）が少なかったこと等が考えられる。

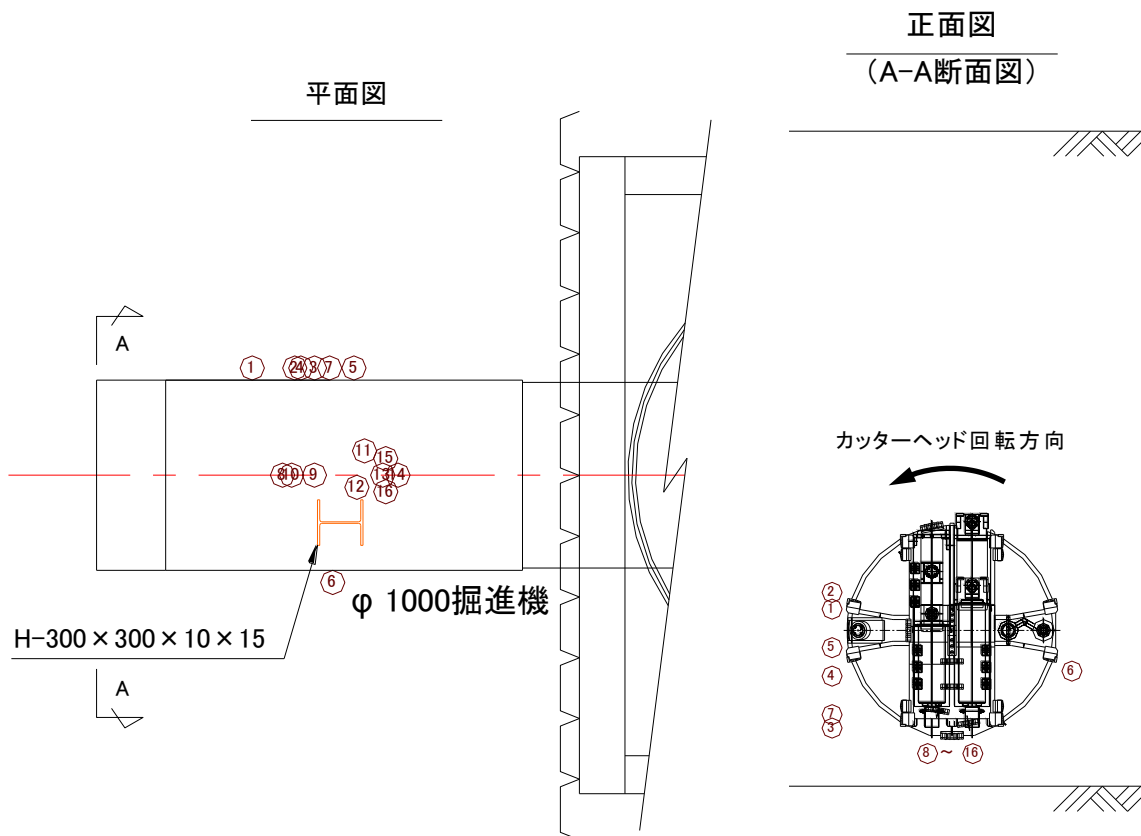


図 3-31 掘進機周辺で確認された切断片の分布状況



表 3-34 掘進機周辺で確認された切断片の位置測定結果

No.	距離および位置			No.	距離および位置		
	L※1	H※2	位置※3		L※1	H※2	位置※3
1	1030	500	左	9	1440	—	下
2	1310	400	左	10	1290	—	下
3	1440	1210	左	11	1770	—	下
4	1350	900	左	12	1720	—	下
5	1700	730	左	13	1890	—	下
6	1560	870	右	14	1990	—	下
7	1540	1130	左	15	1910	—	下
8	1230	—	下	16	1910	—	下

※1 掘進機先端からの距離

※2 掘進機天端からの距離

※3 掘進機正面から見た位置

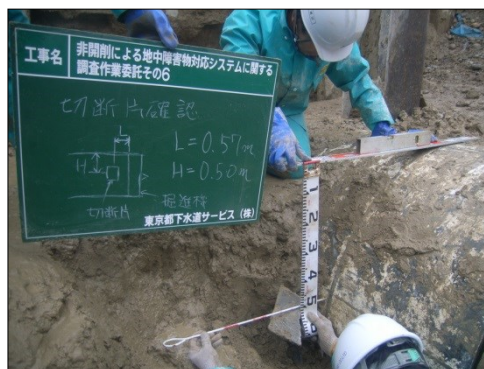


写真 3-19 掘進機周辺で確認された切断片の位置測定状況

### 3-6-3-11 切断における作業性および安全性の確認

#### 1) 作業性について

切断材の練混ぜ等に使用する機材は地上に設置して作業を行うため、従来口径（1500mm 以上）と比較して作業性は変わらないが、操作台車は推進管内に設置して切断を行う必要がある。

したがって、小・中口径化による若干の作業性の低下は想定されるが、前方探査および超高圧地盤改良と同様に、施工上問題ないと考える。

#### 2) 安全性について

切断材の練混ぜ等に使用する機材は地上に設置して作業を行うため、従来口径（1500mm 以上）と比較して安全性は変わらない。推進管内で掘進機操作、切羽作業がある場合は、スペースが狭いため頭上や足元に注意する必要があるが、小・中口径化により極端に安全性が低下することはないと考える。

したがって、従来口径（1500mm 以上）と比較して注意を要する点は増加するが、切断時の安全性は従来口径と同様に問題ないと考える。

### 3-6-3-12 切断片の取込みにおける作業性および安全性の確認

#### 1) 作業性について

切断片の取込みについての作業性は、従来口径（1500mm 以上）と比較して劣る部分は見られなかった。ただし、本実験では、掘進機操作台車を地上に設置して作業を行ったが、通常施工時は操作台車を推進管内に設置して切断を行う必要がある。管の内部で人の作業が可能な口径 800mm 以上の場合には機内操作式で行われるため、小・中口径化による若干の作業性の低下は想定されるが、施工上問題ないと考える。

切断片の取込みにおける排泥管内洗浄作業は立坑内で行ったため、作業性が劣る部分は見られないが、切羽排泥タンクが推進管内にある場合は坑内作業となるため、今後、排泥管の洗浄を推進管内で行う際の作業性を確認する必要がある。

支障物搬出口蓋取外し、排泥管内確認、支障物回収までの作業は狭い作業スペースで行うため、工具が使用し難いといった点があるが、従来口径（1500mm 以上）においても隔壁付近に支障物搬出口が設置されているため、スペースが狭い中での作業となる。

したがって、小・中口径化による若干の作業性の低下は想定されるが施工上問題ないと考える。



## 2) 安全性について

切断片取込掘進から掘進機内回収までの一連の作業を行い、作業の安全性を確認した結果、狭い作業スペースのため、頭上、手足元に十分な注意を払う必要があることが分かった。しかし、従来口径（1500mm 以上）においても掘進機内における作業は、カッターモータや配線・配管が混在しているため、スペースも狭く、足場も悪い状態での作業となる。そのため、小・中口径化により支障物回収の作業性が極端に低下することはないと考える。

したがって、従来口径（1500mm 以上）と比較して注意を要する点は増加するが、切断片取込掘進時および切断片確認時の安全性は従来口径と同様に問題ないと考える。

### 3-6-4 「前方探査技術」「超高圧地盤改良技術」「切断および切断片除去技術」の適用範囲拡大実験のまとめ

#### 1) 稼働確認について

口径 1000mm の実機を用いて、前方探査、超高圧地盤改良、切断・除去の各機能を使用した一連の作業による機器・システムの稼働確認の結果、各作業とも問題なく施工することが確認できた。以上のことから、口径 1000mm においても D0-Jet 工法「技術資料」に記載されている品質管理や設計法で所要の動作が可能である。

以下に「技術資料」等の既存データと本実験データの比較結果を示す。

#### ① 前方探査

表 3-35 に前方探査の品質管理に関わる比較表を示す。表に示すデータは、掘進機のカッターヘッドと支障物の H 形鋼フランジが平行の場合を示している。判定基準には、(※1) に示す実験結果を参考値とした。

H 形鋼の位置および埋設角度（カッターヘッドと H 形鋼のフランジが平行）の解析精度は、判定基準を満足していることから、前方探査に関わる品質管理およびシステム設計に問題ないと考ええる。

表 3-35 解析結果による支障物の判定基準と実験結果の比較

品質管理項目	判定基準（参考値）	実験結果
H 形鋼の位置の 解析精度	平均誤差±7mm（※1）	波形の変化点の読み取り値 変化点①465-462(実測値)=3mm 変化点②155-162(実測値)=-7mm
H 形鋼の埋設角 度の解析精度	解析図の波形突出部が 高い位置で平行に移動 していること（※2）	解析図の波形突出部が高い位 置で平行に移動した

（※1）掘進機外径 1.97m による H300 前方探査の精度確認実験結果<sup>8)</sup>

（※2）D0-Jet 工法「技術資料」

## ② 超高压地盤改良

表 3-36 に超高压地盤改良の品質管理に関わる比較表を示す。

改良体の出来形および一軸圧縮強度は、基準値を概ね満足していることから、超高压地盤改良に関わる品質管理には問題がないと考える。なお、改良体②は、掘進機のほぼ頂部からノズルの設定角度 25° の上向きに改良材を噴射した結果、長さが基準値以下となっている。これは試験地盤の締固め度が低いために、上向きよりも水平方向に改良材の噴射による掘削が拡大した結果と考えられる。

表 3-36 超高压地盤改良の品質管理結果

品質管理項目	基準値（※1）	実験結果	
		改良体番号	実験値(※2)/基準値
出来形	長さ L=1500mm 径 $\phi$ 800mm	改良体①	長さ 98～102% 幅・高さ 101～115%
		改良体②	長さ 84～93% 幅・高さ 134～140%
一軸圧縮強度 (改良体から 採取したコア)	$\sigma_7 =$ 2070kN/m <sup>2</sup> 設計の参考値	改良体①	122～138%
		改良体②	106～108%

（※1）D0-Jet 工法「技術資料」

（※2）改良体出来形の実験値は、表 3-18 の寸法値を用いた。

改良体の一軸圧縮強度の実験値は、表 3-19 の試験結果を用いた。

### ③ 切断および除去工

表 3-37 に支障物の切断・除去の品質管理に関わる比較表を示す。

切断片の数および寸法は、判定基準を概ね満足していると考える。切断片の掘進機内への取込み数とチャンバ内への取込み数を合せた回収率は、30.4%となった。したがって、今後の切断・除去に関する実工事を対象に、地盤条件、支障物の位置、掘進機内に回収するまでの掘進距離などのデータを収集・分析し、回収率の向上を図る必要がある。

表 3-37 切断および除去の品質管理結果

品質管理項目	判定基準	実験結果
切断片の数	切断計画図のとおり（※1）	23 片（切断計画図のとおり）
切断片の寸法	切断計画図のとおり（※1）	小さい塊に変形している（※2）

（※1）D0-Jet 工法「技術資料」

（※2）切断片は、カッターヘッドの回転および取込み時の曲げ・圧縮力等により変形することが従来の口径 1500mm 以上の実工事および実験で確認されている。

### 2) 作業性および安全性の確認について

口径 1000mm の実機に超高圧ジェットシステムを搭載し、D0-Jet 工法の基本機能を用いた試験施工を行い、作業性および安全性を確認した結果、小・中口径化に伴い、注意を要する点は増加するが、従来口径（1500mm 以上）と比較して大きく作業性や安全性が劣る部分は見られなかった。

### 3-6-5 口径 800mm～1350mm の施工実績

小・中口径用の D0-Jet 工法開発後の施工実績を表 3-38 に示す。

表 3-38 口径 800mm～1350mm の施工実績（2017 年 10 月現在）

No.	工事件名	発注者	工事概要	DO-Jet工法 工事期間	DO-Jet工法施工数量等
1	広島南道路(宇品地区) 配水管新設工事(3次)	広島市 水道局	推進工法 口径1,200mm L=551.2m L=477.1m	2011.1-2011.6 2012.1-2012.5	スパン1 ・切断除去 広幅鋼矢板Ⅳ型 全面1箇所 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良 スパン2 ・切断除去 広幅鋼矢板 全面1箇所 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良
2	遠山ルート配水管布設 工事(駒井野隧道)	成田市 水道部	推進工法 口径800mm L=237.9m	2012.1-2012.7	鋼矢板Ⅲ型の判明 改良土の切断掘進
3	港区西新橋三丁目付近 再構築その3工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,000mm L=234.1m	2012.9-2012.12	・切断除去 H-300×300 3本 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良 地下通路防護 到達人孔接続部地盤改良
4	港区新橋二、三丁目付 近再構築その2工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,000mm L=202.1m	2013.6-2013.8	・切断除去 残置鋼矢板2枚 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良
5	港区白金台五丁目、品 川区上大崎二丁目付近 再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,000mm L=165.1m	2012.11-2013.10	・切断除去 支障物 4箇所 ・超高圧地盤改良 支障物周辺の地盤改良 旧防空壕防護改良 L=12.6m 急曲線防護改良(R=15m) L=15.0m
6	中央区築地四、六丁目 付近再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,100mm L=426.1m	2016.4-2016.9	・切断除去 松杭(φ 300) コンクリート塊 ・超高圧地盤改良 水道管の防護改良 L=5.0m 到達部防護改良
7	台東区上野五丁目付近 再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,000mm L=45.6m	2016.5-2016.10	支障物保険方式からDO-Jet工へ変更 ・切断除去 残置H鋼杭(H-250)1本 ・超高圧地盤改良 支障物切断の防護改良 ・地中接合仕様(スライドフード)掘進機
8	第二中央幹線妙典推進 工区配管工事	京葉ガス(株)	推進工法 口径1,200mm L=123.3m	2017.9-2017.10	・超高圧地盤改良 ボックスカルバートの防護改良10スパン(14.9m)
9	北区神谷一丁目付近再 構築その2工事	東京都 下水道局	推進工法 口径900mm L=66.75m 推進工法 口径1,100mm L=111.95m	施工中	・超高圧地盤改良 既設管到達時の防護改良 ・超高圧地盤改良 既設下水道幹線の防護改良
10	大田区東馬込一丁目、 品川区西大井五丁目付 近枝線工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,000mm L=326.8m	施工中	・超高圧地盤改良 周辺地盤防護改良 L=325.8m 285スパン)
11	荒川区東尾久六丁目地 先から同区東尾久三丁 目地先間配水本管 (500mm)新設工事	東京都 水道局	推進工法 口径1,000mm L=126.6m	施工中	・切断除去 鋼矢板Ⅱ型 全面2箇所 ・超高圧地盤改良 東電管路の防護改良及び支障物周辺の地盤改良
12	台東区上野四、七丁目付 近再構築工事	東京都 下水道局	推進工法 口径1,350mm L=392.5m	準備中	・超高圧地盤改良 既設到達人孔の到達防護改良 7スパン(7.7m)

## [参考文献]

- 1) 地盤工学・実務シリーズ 29 シールド工法 地盤工学会 pp. 318, 2012
- 2) ウォータージェットの流動特性とその切削性能の高度化に関する研究  
吉田宏 pp. 1-5, 2011
- 3) トンネル標準示方書シールド工法・同解説 土木学会 pp. 122-124, 2010
- 4) D0-Jet 工法技術資料 2010 D0-Jet 工法研究会
- 5) ジェットグラウト工法技術資料第 18 版 2010 日本ジェットグラウト協会
- 6) D0-Jet 工法積算資料 2011 D0-Jet 工法研究会
- 7) 下水道推進工法の指針と解説 日本下水道協会 pp. 64-65, 2010
- 8) D0-Jet 工法に関する技術調査報告書 東京都下水道サービス(株), 日本水  
工設計(株) pp. 6-13, 2010



## 第4章 地盤改良用2液混合噴流の地盤掘削特性に関する研究

### 4-1 研究の背景

D0-Jet 工法は、推進工法またはシールド工法の掘進機に、2液混合噴流（超高压ジェットと低压ジェットを混合して噴射する方式）を用いた超高压噴射システムを搭載し、地中に残置された鋼矢板やコンクリートパイルなどの支障物を切断・除去し、また、地盤改良などを行う工法として多くの施工実績があり、その適用は拡大してきている。本工法の施工方法や切断性能、地盤改良の精度および改良範囲、周辺地盤への影響などは、これまでに多くの実験によって検証されており、それらは設計・施工報告<sup>1)~6)</sup>および研究報告<sup>7)8)</sup>としてまとめられている。

一方、2液混合噴流の動圧分布やその減衰などの地盤中の挙動は、施工中に計測することが困難なことから、ジェット噴流が近接構造物などに与える影響やその範囲を明らかにするには至っていない。

### 4-2 研究の概要

本研究では、実工事における被圧下での超高压ジェット噴流の挙動を捉えるために、被圧状態の地盤を再現できる大型の圧力容器を製作した。

この圧力容器を用いた水中噴射実験により2液混合噴流の動圧分布を測定し、飽和地盤中における地盤改良時の影響範囲について考察した。

地盤掘削実験は、圧力容器中に模擬地盤を作製し、その掘削過程を観測するものであり、これにより2液混合噴流の動圧と地盤掘削の進行状況を把握した。

また、水中噴流に関するFVM解析（有限体積法）を実施し、動圧の測定結果とFVM解析結果とを比較検討することでその影響や範囲を検証した。さらに、地盤の掘削過程を表現するためFVM解析を行った。

なお、代表的な流体解析手法としては、FDM（有限差分法）、FVM（有限体積法）、FEM（有限要素法）がある。FVMは他の手法と比べ、収束性が良く計算時間も早い。そのため市販の流体解析ソフトウェアではFVMが用いられることが多いことから、本研究においてもFVMによる解析を行った。

## 4-3 実験装置の製作

### 4-3-1 圧力容器の仕様

写真 4-1 は圧力容器の外観を示したものである．圧力容器には，スタンドオフ距離（超高圧噴射ノズル出口から動圧測定位置までの距離を言う．以下，SD と呼ぶ）を変えて噴流状態を観測するために，観測用窓と測定用窓を 330mm ピッチにそれぞれ 6 か所装備している．

圧力容器は，水深 50m までの環境を再現できるように耐圧 0.5MPa とし，圧力容器の上部フランジに取り付けた調整弁により圧力をコントロールできるようにした．ノズル装着部は，写真 4-2 に示すように隔壁で仕切り，掘進機のカッターヘッドとチャンバを模擬した．

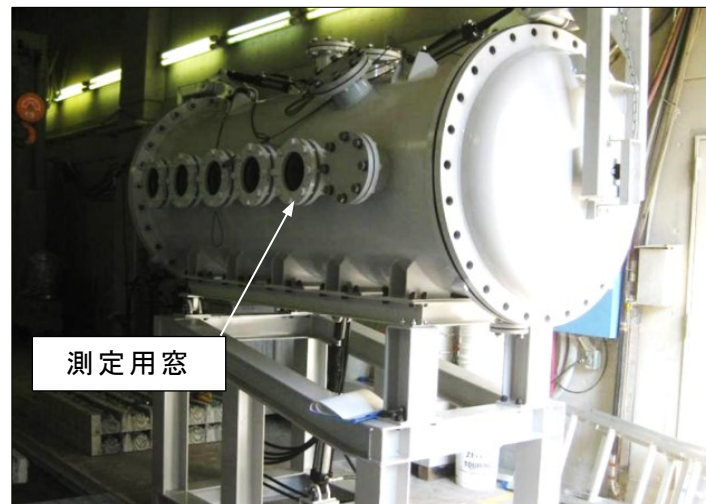


写真 4-1 圧力容器の外観

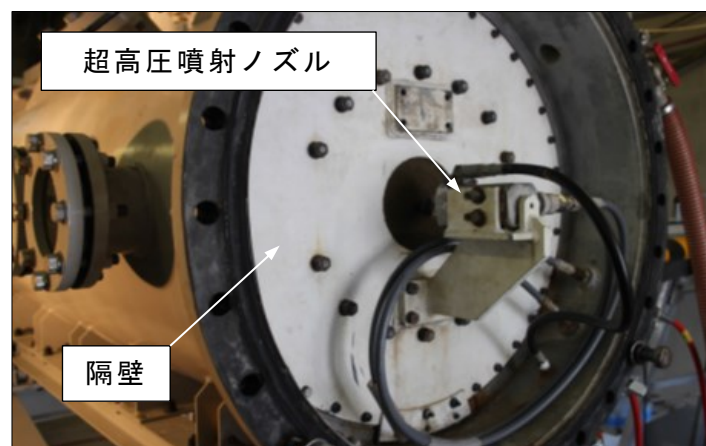


写真 4-2 圧力容器内のノズル装着部と隔壁



#### 4-3-2 動圧測定センサの仕様

流体の動圧測定には、一般にピトー管が使用される。しかし、超高圧ジェットノズルの近傍では流速が極めて速いことを考慮して、その材質および形状を検討した。その結果、図 4-1 および図 4-2 に示す形状の動圧測定センサを製作した。

また、超高圧ジェット噴流は、噴流の半径方向に動圧が分布するため、動圧センサチップを噴流軸と直角方向に移動させる必要がある。このため、写真 4-3 に示すセンサロッドを所定の速度で移動するための動圧測定センサ移動装置を製作し、圧力容器の測定用窓に装着した。圧力容器への動圧測定センサの配置状況を図 4-3 に示す。

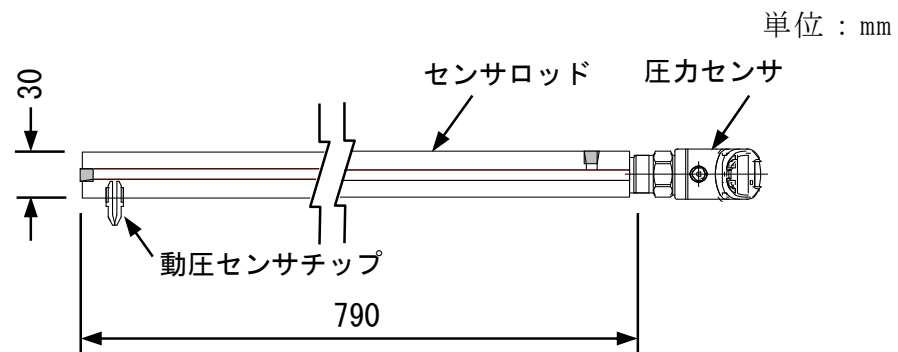


図 4-1 動圧測定センサ

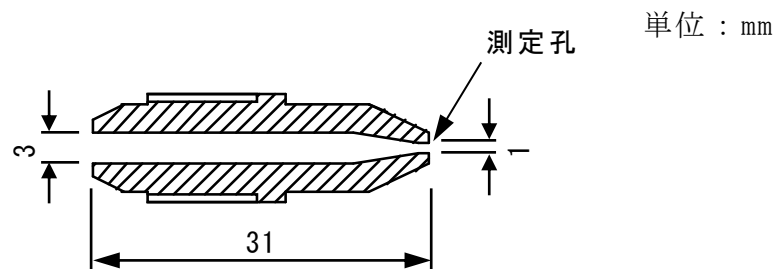


図 4-2 動圧センサチップ詳細図

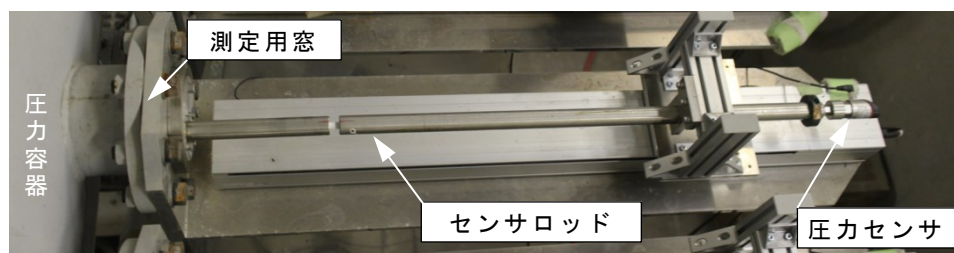


写真 4-3 動圧測定センサ移動装置

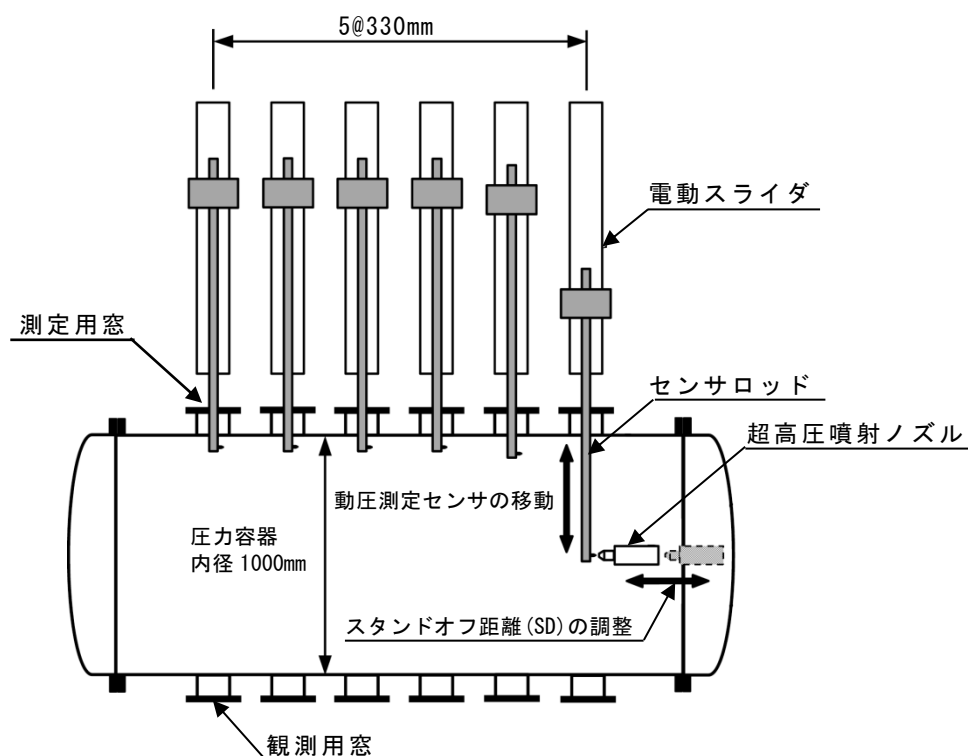


図 4-3 動圧測定センサの配置状況

#### 4-3-3 動圧測定センサの精度確認

本実験は、超高圧ジェット噴流の動圧を正確に測定し、その分布を数値的に把握することを目的としている。このため、以下に示す方法で事前にセンサの精度の確認を実施した。一般に気中の単一噴流では、噴射ノズルの出口近傍での動圧測定値と噴射圧力とが理論上ほぼ等しくなる。

そこで、ジェットライン（以下 WJ ラインと呼ぶ）を閉鎖したうえで、アブレシブライン（以下 AJ ラインと呼ぶ）から一定圧力で大気中に噴射し、単一噴流の動圧を測定した。噴射する流体は、取扱いの容易さを考慮して水とした。以降の実験でも流体は、すべて水を使用した。図 4-4 に、二液混合ノズルの構造概要図を示す。

実験では、アブレシブノズル（以下 AJ ノズルと呼ぶ）出口から 2mm の位置にセンサを配置し、AJ ラインの噴射圧力を 4 水準（0.5, 1.0, 1.5, 2.0MPa）として動圧分布を測定した。図 4-5 は噴射圧力 0.5, 2.0MPa の場合の動圧の測定値と算定噴射圧力とを比較した結果である。算定噴射圧力は、AJ ラインのポンプ圧力から配管およびノズル内部の圧力損失を差し引いたものである。

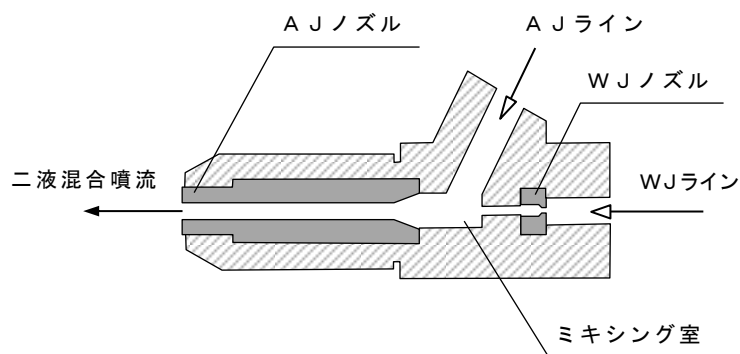


図 4-4 二液混合ノズルの構造概要

図 4-5 は、噴流軸中心部を 0mm として、噴流の端部間（-5mm～5mm 付近）を一定の速度でセンサをスライドした場合の圧力の変化を示している。動圧の測定値および算定噴射圧力はともに、0.1～0.2MPa の振幅の波形を示しているが、これは AJ ラインの供給ポンプによる脈動が表示されたものである。噴流幅は、AJ ノズル径 6mm に対し、約 8mm まで拡大した。これは孔径 1mm の測定孔の一部に噴流が衝突し、実際の噴流の幅よりやや広がったためである。

実験結果から、噴流中心部の領域では動圧の測定値と算定噴射圧力とがほとんど一致しており、センサの測定精度が極めて高いことが確認できた。

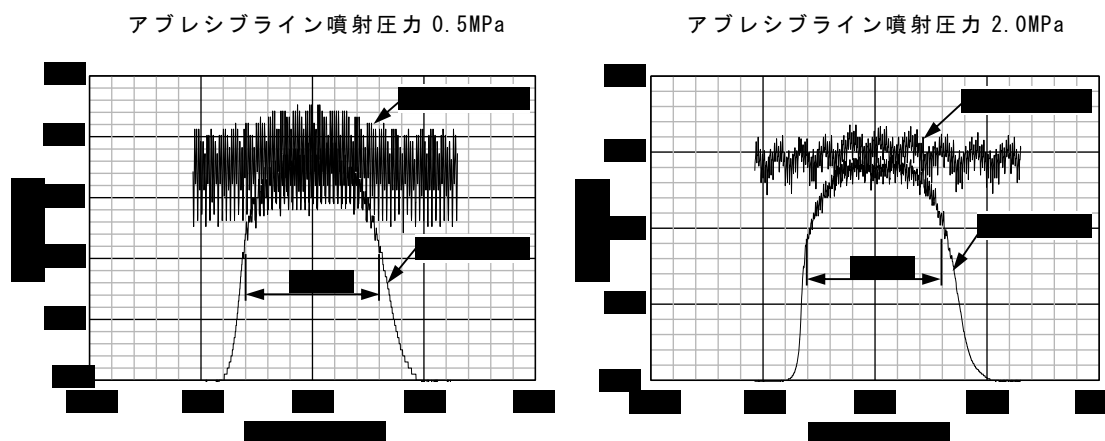


図 4-5 動圧測定センサの精度確認試験結果

#### 4-3-4 ミキシング室内の噴流特性

超高圧ジェットによる地盤改良の場合には，AJ ラインから 1MPa 程度の圧力で供給されるセメントミルクと，WJ ラインからの超高圧水流とがミキシング室内で混合し，2 液混合噴流として噴射される．

ミキシング室内の混合過程で，WJ ラインからの高速水流の運動量が，周辺流体にどのように伝達するかを確認するため，噴射圧力 80MPa のウォータージェットを圧力容器中で噴射し，スタンドオフ距離（SD）を伸ばしながら噴流軸中心の動圧を測定した．その結果は図 4-6 に示すとおりである．パラメータは，容器内の圧力とした．同図から明らかなように，中心動圧は SD が長くなるとともに減衰する．この現象は高速噴流の運動量が周辺流体に伝達されていることを示している．SD=80mm 程度で動圧の減衰は緩やかになっており，高速噴流と周辺流体とはほぼ一体化していると考えられる．

本工法に搭載する超高圧噴射ジェットノズルは，ミキシング室から AJ ノズルの出口までの距離が約 100mm であり（図 4-7 参照），中心の高速噴流と周辺流体（セメントミルク）が一体化するには十分の長さであると判断される．これによって，WJ ラインからの流れと AJ ラインからの流れは一体化し，AJ ノズルから噴出するものと考えられる．

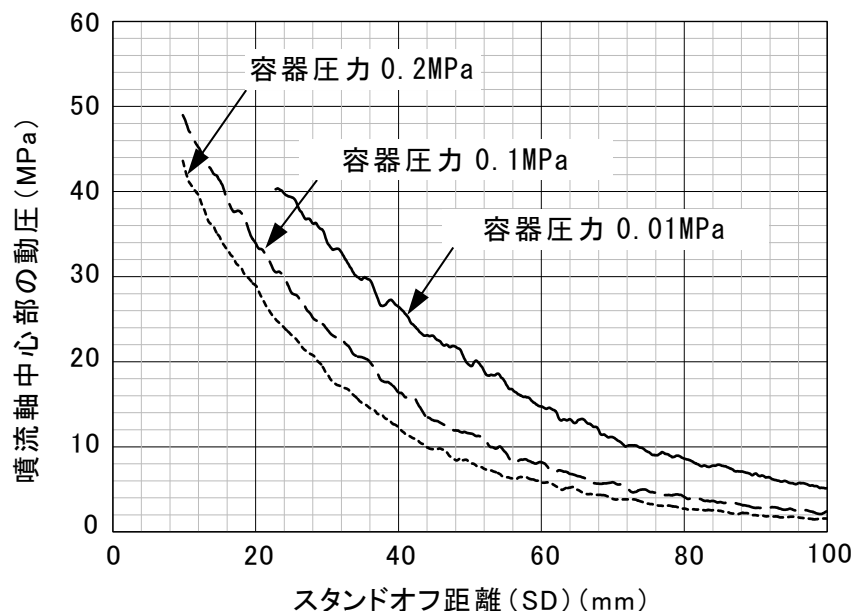


図 4-6 水中における噴流軸中心部の動圧測定結果

#### 4-4 加圧水中における噴流状態の目視観察

地盤中におけるウォータージェット噴流の挙動は、一般に土水圧の影響を受ける<sup>9)</sup>ことが知られている。水中で噴射されたウォータージェットでは、ノズル近傍でキャビテーション（管路の拡大や渦流に伴う圧力低下により発生する蒸気泡）が生じる。ウォータージェットを水中で噴射した場合には、ジェット噴流の周囲に強い渦流が生じ、キャビテーションはその中で発生する。これにより周辺の水の抵抗が緩和されるため、噴流速度的低下と噴流幅の拡大が抑制される。一方、加圧された水中の場合には、圧力の上昇に伴いキャビテーションの発生が抑制される。

これらの現象を観測するために、加圧した圧力容器中で超高压ジェットを噴射し、ノズルに最も近い観察用窓から噴流を写真撮影した。噴射圧力は WJ ラインで 200MPa、AJ ラインで 1MPa とした。容器内の圧力は、水深 0.5m の大気圧を模擬したケースと水深 30m 相当の 0.3MPa に設定したケースとで実施した。写真 4-4 は、それぞれの容器内の圧力に対する噴流状態を撮影したものである。この写真で白濁した部分がキャビテーションの発生箇所であり、容器内の圧力の上昇とともに明らかにその範囲が縮小している。この現象が超高压ジェットの地盤掘削性能に与える影響については、4-7 節で詳述する。

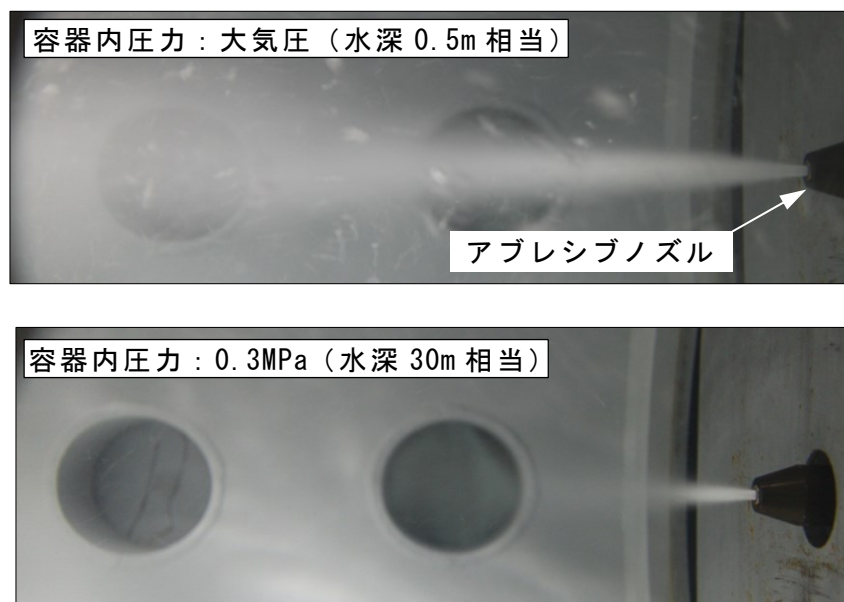


写真 4-4 圧力容器内の噴流状況

## 4-5 ノズル内の混合過程のモデル化とその検証

### 4-5-1 運動量保存則による混合噴流の噴出速度

本工法による地盤改良では，AJ ラインから 1MPa 程度の圧力でセメントミルクを圧送する．この液体は WJ ラインからの高速噴流とミキシング室内および AJ ノズル内で混合される．2 液混合ノズルの WJ ノズルの出口から AJ ノズルの出口までの距離は約 100mm であり，4-4 節で示したウォータージェットの水中噴射実験の結果から，噴流軸中心部の高速噴流が周囲の水に運動量を与え，一体化した流れとなるには十分な長さで判断される．このことから，WJ ラインの運動量と AJ ラインの運動量は加算され，一体化した噴流となり AJ ノズルから噴出すると想定できる．2 液混合ノズルからの混合噴流の噴出速度は，前述したように噴流が一体化されると仮定すれば，以下の手順で算定することができる．

2 液混合ノズルにおける混合過程を図 4-7 に示す．

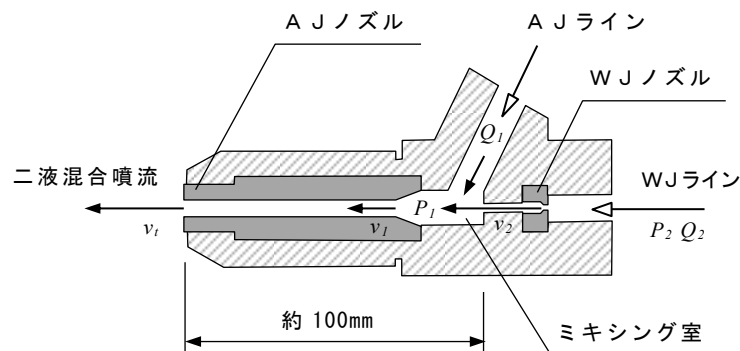


図 4-7 2 液混合ノズルの混合過程

一般に気中に噴射された自由噴流においては大気圧およびノズル内壁摩擦損失を無視すると，噴射圧力  $P$  [Pa]，噴流平均速度  $v$  [m/s] と質量流量  $Q$  [kg/s] および噴流の運動量流束  $M$  [kg・m/s<sup>2</sup>]の間には以下の関係がある．

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot v^2 \quad (4-1)$$

$$M = Q \cdot v = Q \cdot \sqrt{\frac{2P}{\rho}} \quad (4-2)$$

ここで， $\rho$  は流体の密度 [kg/m<sup>3</sup>] である．

AJ ラインでは流量計で測定した体積流量  $Q_1'$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] と AJ ノズルの有効断面積  $A_1$  [ $\text{m}^2$ ] から (4-3) 式で流速を算出し、単位時間あたりの運動量流束を求める。

$$v_1 = \frac{Q_1'}{A_1}, \quad M_1 = v_1 \cdot Q_1' \cdot \rho_1 = v_1 \cdot Q_1 \quad (4-3)$$

AJ ラインからミキシング室に流入した流れは複雑で三次元流れとして扱う必要があるが、最終的には AJ ノズルのテーパー部で加速され、直線部では  $v_1$  という速度を持つ一次元流れとなる。(4-3) 式は AJ ノズル直線部の一次元流れを記述しており、速度も運動量もスカラーで表記した。

WJ ラインの測定は、超高压で使用可能な流量計の調達が困難なことから (4-4) 式に示すように、噴射圧力  $P_2$  と WJ ノズルの断面積  $A_2$  [ $\text{m}^2$ ] から体積流量  $Q_2'$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] を求め、(4-5) 式で運動量流束  $M_2$  を求める。

$$Q_2' = A_2 \cdot v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2P_2}{\rho_2}} \quad (4-4)$$

$$M_2 = v_2 \cdot Q_2' \cdot \rho_2 = v_2 \cdot Q_2 \quad (4-5)$$

WJ ノズルから噴出する流れはミキシング室に流入した時点から AJ ラインからの流れと相互作用して運動量の伝達が生じるが、半径方向の速度成分は微少で概ね一次元流れと見なせる。よって、AJ ノズルから噴出する混合噴流の運動量流束  $M_t$  は、(4-6) 式に示すように  $M_1$  と  $M_2$  のスカラー和で求められ、これを合計流量で除せば、(4-7) 式に示すように混合噴流速度  $v_t$  が得られる。

$$M_t = M_1 + M_2 \quad (4-6)$$

$$v_t = \frac{M_t}{Q_1 + Q_2} \quad (4-7)$$

#### 4-5-2 算出された流速の検証

算出された流速の妥当性を確認するため、高速度ビデオを用いて噴流を撮影し、実際の流速を測定した。噴流の速度は、図 4-8 に示すように遮へい板により瞬間的に遮断し、噴流の後尾の位置変化を 1000 フレーム/s のフレーム間の移動量から求めた。WJ ラインの噴射圧力は、噴流の後尾の移動量がフレーム内に納まるように 50MPa に設定した。

その結果は表 4-1 に示すとおりである。また、写真 4-5 および写真 4-6 は、閃光時間  $2\mu\text{s}$  以下のフラッシュで撮影した静止画像である。表 4-1 からわかるように、AJ ライン単独の噴射の場合も、超高压混合噴射の場合も、実測し

た噴流の速度は，運動量保存則から算出した噴流速度と概ね一致しており，運動量保存則が成立することを示している．

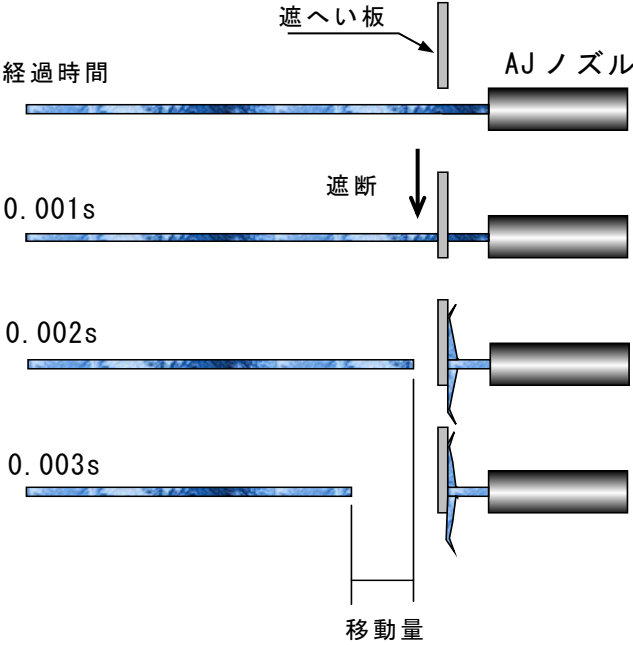


図 4-8 画像による流速測定方法概要図

表 4-1 算定流速と実測流速の比較

実 験 項 目			単独噴射	混合噴射
[1]AJライン	噴射圧力	MPa	0.2	1.0
	ノズル径	mm	6.00	6.00
	質量流量	kg/s	0.5116	1.1439
	噴流速度	m/s	18.102	40.477
	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>	9.260	46.302
[2]WJライン	噴射圧力	MPa	/	50.0
	ノズル径	mm		1.35
	質量流量	kg/s		0.4255
	噴流速度	m/s		316.23
	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>		134.57
[1]+[2]	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>	-	180.87
混合噴流の算定速度		m/s	18.10	115.25
画像解析	移動量/1ms	mm	16.00	120.0
	噴流の実測流速	m/s	16.00	120.0





写真 4-5 AJ ライン単独噴射状況



写真 4-6 2 液混合噴射状況

## 4-6 水中における噴流の動圧の測定

### 4-6-1 実験条件

超高圧噴射システムを用いた地盤改良を想定し、近接構造物などへの影響を確認するため、SD と容器内の圧力をパラメータとして実験を行った。この地盤改良システムの稼働時の標準仕様は、WJ ラインの噴射圧力が最大 245MPa、噴射流量が 55L/min で、AJ ラインが流量 70L/min である。実験では、WJ ラインの圧力を実験用ポンプの最大圧力である 200MPa に、AJ ラインの噴射流量を 70L/min に固定した。

### 4-6-2 実験結果

#### 4-6-2-1 動圧分布

図 4-9 は、容器内の圧力を水深 0.5m 相当に設定して噴射したときの動圧分布をそれぞれ SD ごとに示したものである。

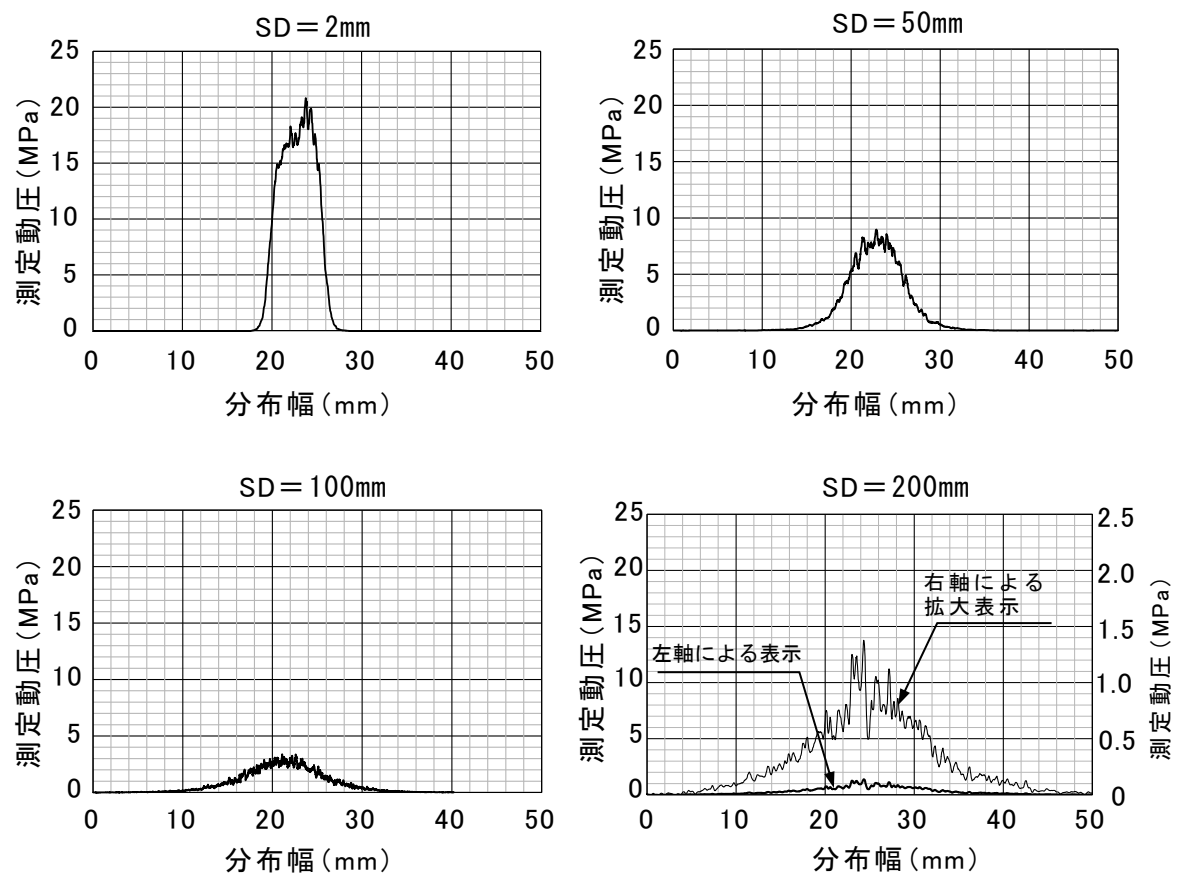


図 4-9 動圧スタンドオフ距離－動圧分布測定結果

これらの図をみると  $SD=2\text{mm}$  では動圧が高く立ち上がり分布幅（噴流幅）が狭いが、 $SD$  が  $50\text{mm}$ ,  $100\text{mm}$ ,  $200\text{mm}$  と大きくなるほど噴流幅が広がっていることがわかる。これは噴流がもつ運動量が周囲の水に遷移したためと考えられる。動圧の減少は急激で、 $SD=2\text{mm}$  の最大動圧に比べて  $SD=100\text{mm}$  では約  $1/5$  に、 $SD=200\text{mm}$  では  $1/10$  以下になっている。

圧力容器内で噴流の動圧を測定している状況を図 4-10 に示す。

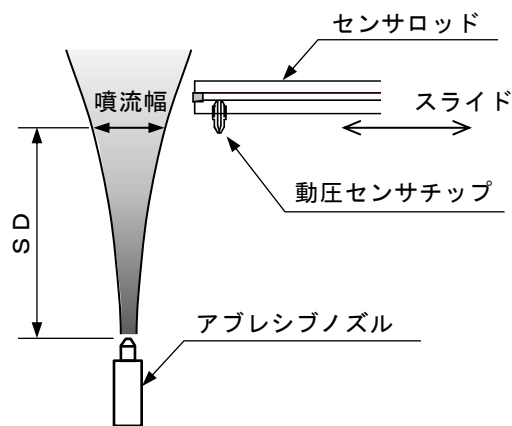


図 4-10 動圧測定状況のイメージ

#### 4-6-2-2 噴流軸中心部の動圧と噴流幅

図 4-11 および図 4-12 は、水深  $0.5\text{m}$  相当、 $10\text{m}$  相当、 $20\text{m}$  相当の 3 ケースで容器内の圧力を調整して、 $SD$  と噴流軸中心部の動圧および噴流幅との関係を示したものである。スタンドオフ距離が  $200\text{mm}$  までの噴射実験では、3 つの水深相当それぞれで動圧および噴流幅ともほぼ同じ測定値を示すことが確認できた。そのため、図 4-11 および図 4-12 とともにスタンドオフ距離が  $200\text{mm}$  以降の測定は、容器内の圧力を水深  $0.5\text{m}$  相当で実施した結果のみを示している。

また、動圧分布や噴流幅の変化を視覚的に把握するため、 $SD$  と噴流幅を同一のスケールとした模式図を図 4-13 に示す。図の分布は、動圧測定センサを噴流軸に対して垂直方向に移動して測定した動圧の上昇起点①と下降終点②間の距離を噴流幅として示している。分布図内の二次曲線は、 $SD$  が大きい位置の動圧分布を識別可能とするため、動圧が最大となる点を噴流速度に変換した点を③として、両端の①、②を結んだものである。

軸中心部の動圧は  $SD$  が大きくなるとともに減衰し、 $SD=400\text{mm}$  では  $130\text{kPa}$ 、 $SD=800\text{mm}$  では  $20\text{ kPa}$  まで低下した。この値は比較的軟弱な粘性土の一軸圧縮強さ以下に相当する。さらに、 $SD=1000\text{mm}$  では粘性土地盤の掘削限界に至

る．一方，水深（容器内の圧力）が増加しても軸中心部の動圧や噴流幅には変化が見られず，いずれの水深でも同様の噴流構造となっていることがわかる．

すなわち，超高压噴射システムを用いた地盤改良では，被圧の大小は地盤の掘削能力に影響しないことが確認できる．また，噴流幅は，SD が大きくなるほど周囲の水を取り込み拡大した．SD=900mm の場合の噴流幅は，ノズル出口付近の幅の約 25 倍になった．結果として，高速でかつ小径の超高压 2 液混合噴流は，SD の増加とともに低速で噴流径の大きな流れに変化していくことが確認できた．

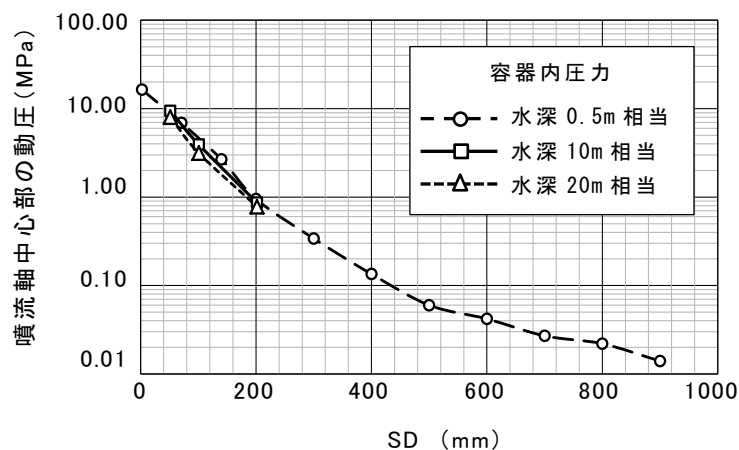


図 4-11 噴流軸中心部の動圧測定結果

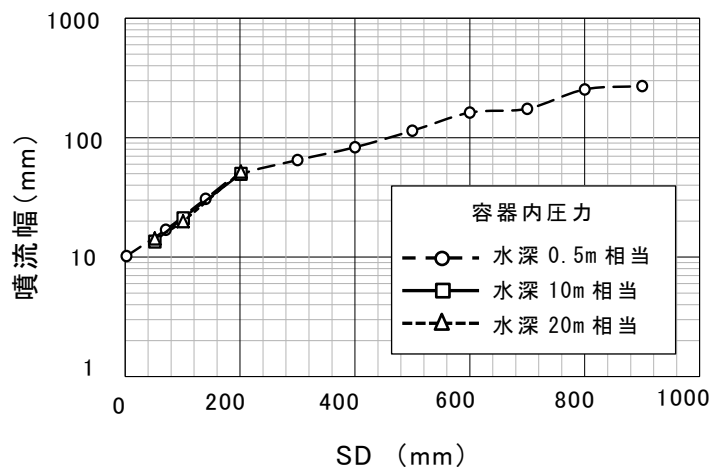


図 4-12 噴流幅の測定結果

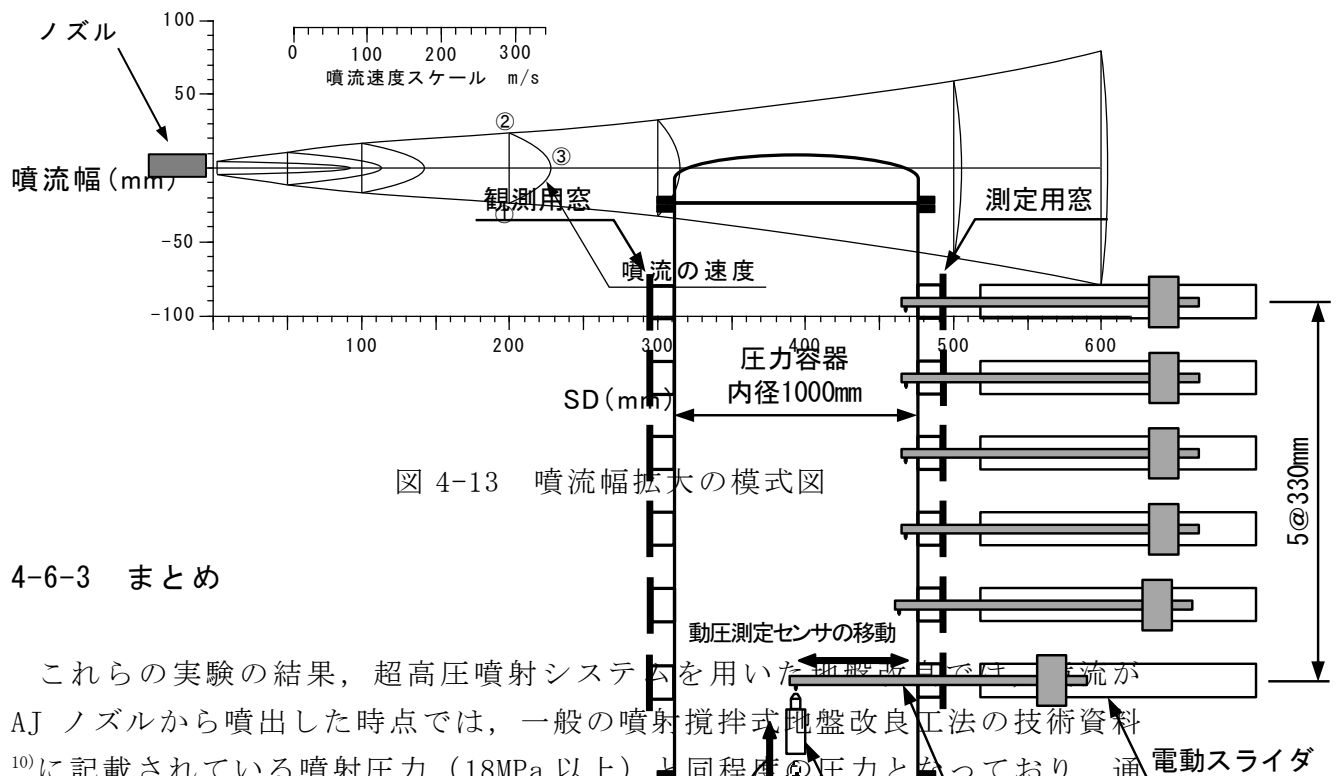
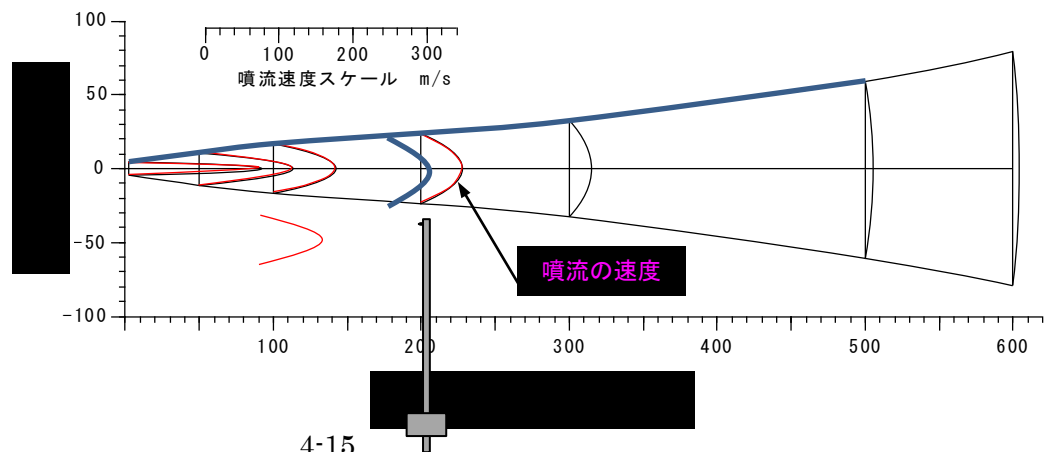


図 4-13 噴流幅拡大の模式図

#### 4-6-3 まとめ

これらの実験の結果，超高压噴射システムを用いた地盤改良では，一般の噴射攪拌式地盤改良工法の技術資料<sup>10)</sup>に記載されている噴射圧力（18MPa 以上）と同程度の圧力となっており，通常 18～100N/mm<sup>2</sup> 程度の圧縮強度とされる<sup>11)</sup>コンクリート構造物に損傷を与える圧力レベル以下となっていることがわかった．また，動圧超高压噴射ノズルの距離が長くなればなるほど大きく低下し，距離が 1000mm の位置で地盤の掘削限界に至る．すなわち，本超高压噴射システムを用いた地盤改良では，近接構造物を損傷する可能性は極めて低いことが確認できた．



#### 4-7 乱流モデルによる水中における噴流の流動特性の FVM 解析

水中における動圧の計測実験で得られた測定値の妥当性を検証するとともに、掘削空間における噴流の流動状態および掘削空間の内壁に作用する力を把握するために FVM 解析（有限体積法）を実施した。

##### 4-7-1 定常解析モデル

解析には 2 次元軸対称モデルを用いた。解析条件は表 4-2 に示すとおりである。解析は掘削の進行に伴う空間の拡大を模擬するために、容器の直径  $D$  および長さ  $L$  を変化させて行った。

表 4-2 解析条件

解析コード	ANSYS FLUENT 定常解析						
座標	2 次元軸対称						
乱流モデル	Realizable k-epsilon+Enhanced Wall Treatment						
解析形状	長さ $L$ (mm)						
直径 600 mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	—
直径 800 mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	—
直径 1000 mm	600	800	1,000	1,200	1,400	1,600	1,800

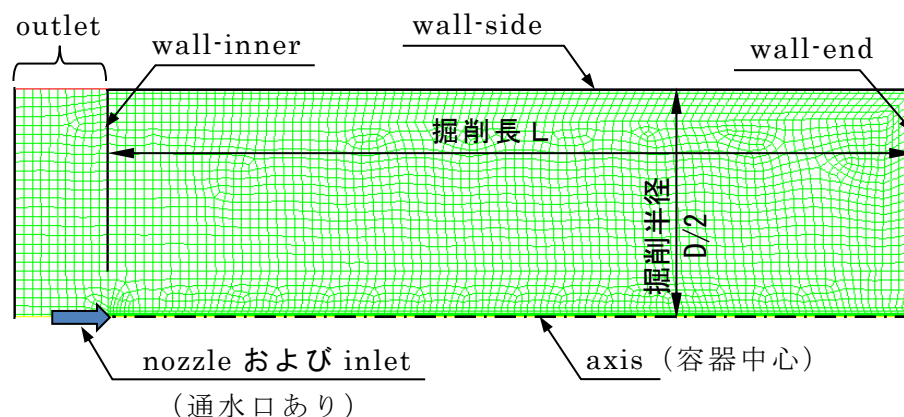


図 4-14 メッシュ分割と解析領域

図 4-14 はメッシュ分割の一例を示したものであり、同図には解析領域を便宜上区分け（以下ゾーンと呼ぶ）をして示してある。ゾーンは後述する地盤掘削実験の容器の形状を考慮して定めた。図で axis は噴流軸で、これを中心に軸対象としている。wall-side は容器の内壁，wall-end は容器の先端の境界である。wall-inner の左はチャンバを模擬しており，上部に排出口として outlet

を設けた．また，inlet はノズルの先端を表し axis 上の wall-inner との交点に設置した．ノズルの周辺には直径 200mm の通水口を設けている．inlet は半径 5mm の速度境界とし，実測で得られた  $SD=2\text{mm}$  の動圧分布を速度分布に変換して与え，一方，outlet は圧力境界として大気圧を与えた．混合ノズルの噴射条件は，動圧測定と同様に，WJ ラインの圧力を 200MPa，AJ ラインの噴射流量を 70L/min に固定した．

#### 4-7-2 解析結果

図 4-15 は動圧分布の実測値と解析値との関係の一例を示したものである．図 4-15 の左図は inlet の入力値を示している．図 4-16 は  $SD$  の増加にともなう動圧分布の中央値と分布幅の変化を示している．これらの図から，解析値は，動圧分布形状および  $SD$  の増加にともなう中心動圧と分布幅の変化とも，実測値を精度よく表しており，解析値と実測値双方の妥当性が確認できる．

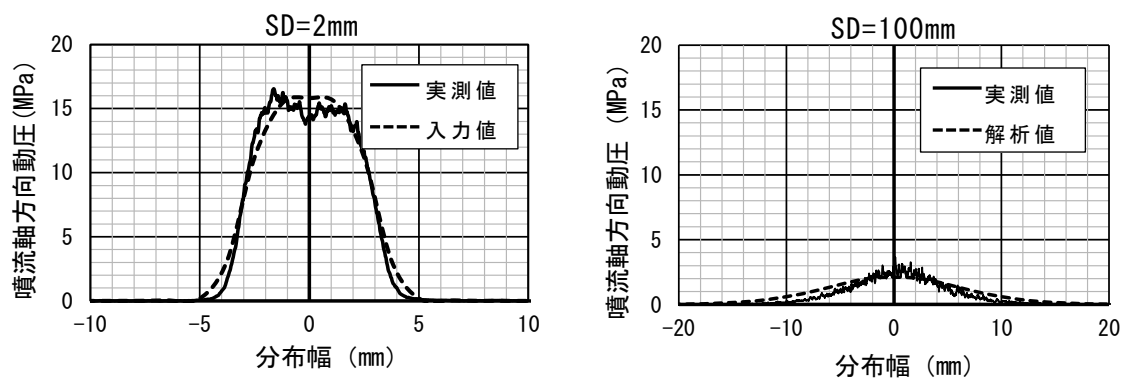


図 4-15 動圧分布の実測値と解析値  
(D1000, L1800)

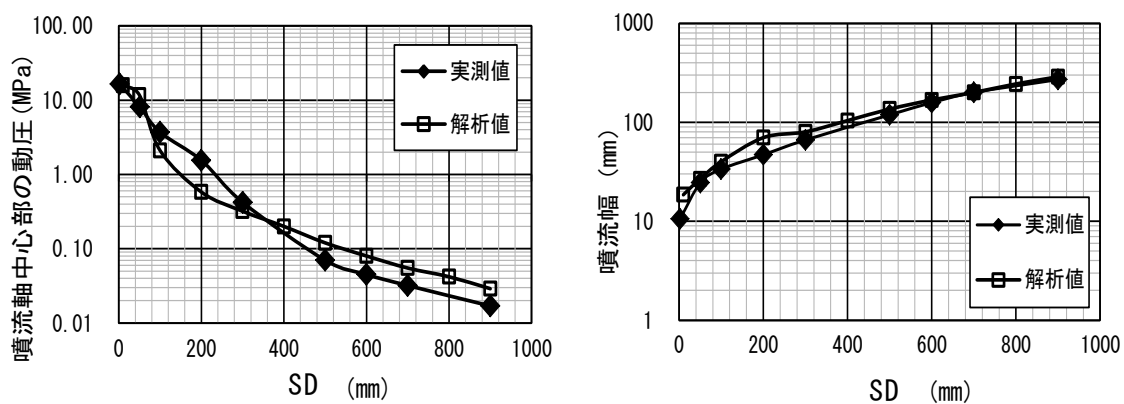


図 4-16  $SD$  増加に伴う中心動圧と噴流幅の変化  
(D1000, L1800)

掘削の進行にともなう噴流の流動状態の変化を模擬するため、wall-end の位置を移動させて解析した結果を図 4-17 および図 4-18 に示す。図 4-17 は inlet を始点とし、要素毎にベクトルの方向のみを考慮して速度ベクトルを接合した線を描いたもので、容器径 600mm の場合のノズルから噴出した流体の軌跡を示している。速度は色で表示している。接合要素数を 10000 に設定したため相当数の循環流れを表している。

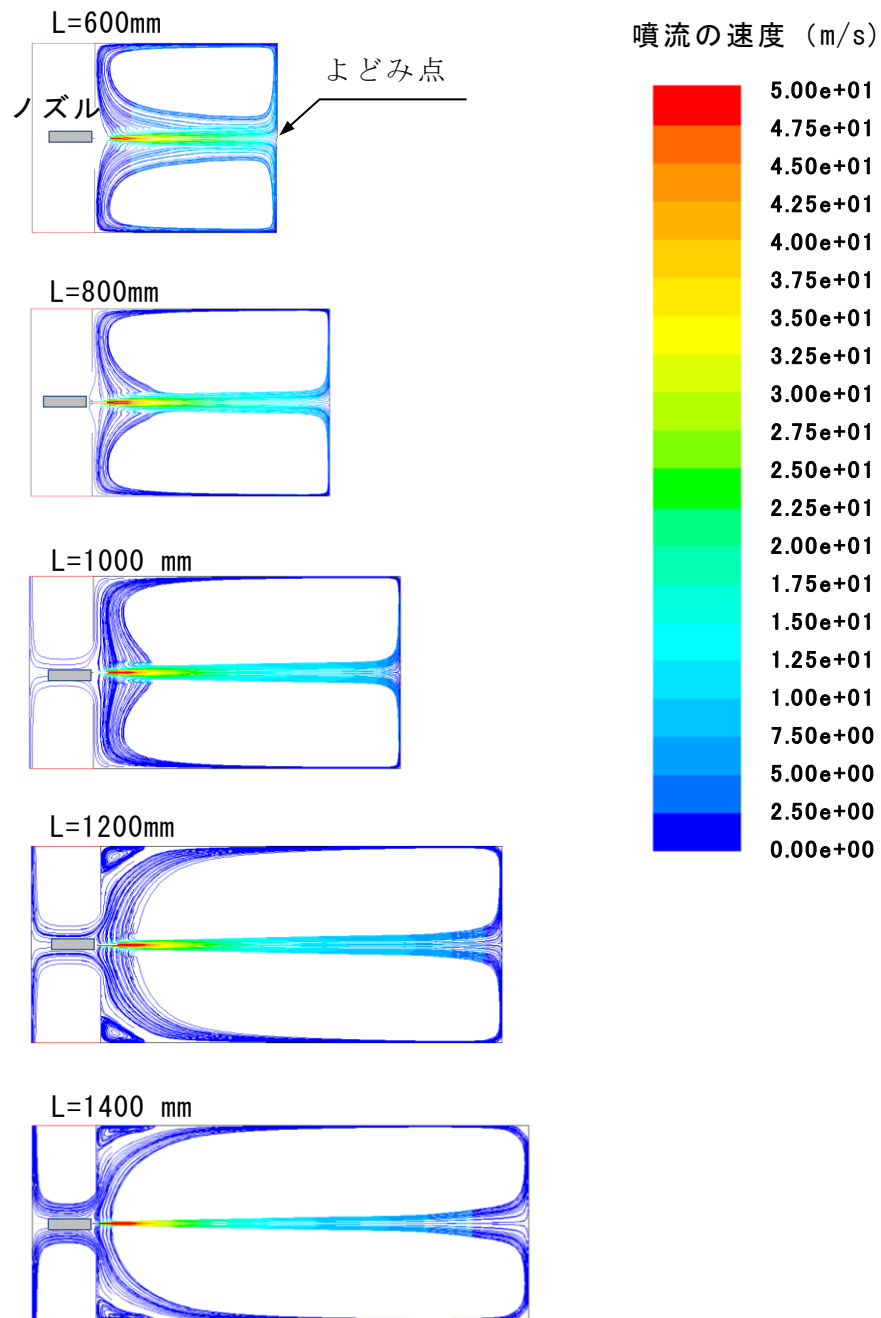


図 4-17 掘削の進行に伴う流体の軌跡 ( $D=600$ )



図 4-18 は容器径 800mm の場合の速度ベクトルを示している．これらの図から，噴流は wall-end に到達すると半径方向の流れとなり，wall-side に向かい，さらにその流れは wall-side に沿い wall-inner 方向に戻る．戻った流れは一部が通水口から outlet に排出され，残りはノズルから高速噴流に巻き込まれることがわかる．境界の壁に作用する力は，壁に垂直の速度成分によるよどみ点の圧力（せき止め圧）と壁に平行な流れによるせん断力であるが，wall-end の中央部と wall-side の wall-end 近傍ではせき止め圧が卓越し，それ以外の部分にはせん断力が作用している．いずれの力も掘削の進行（L の増大）にともない低下し，掘削限界に至ると推定される．

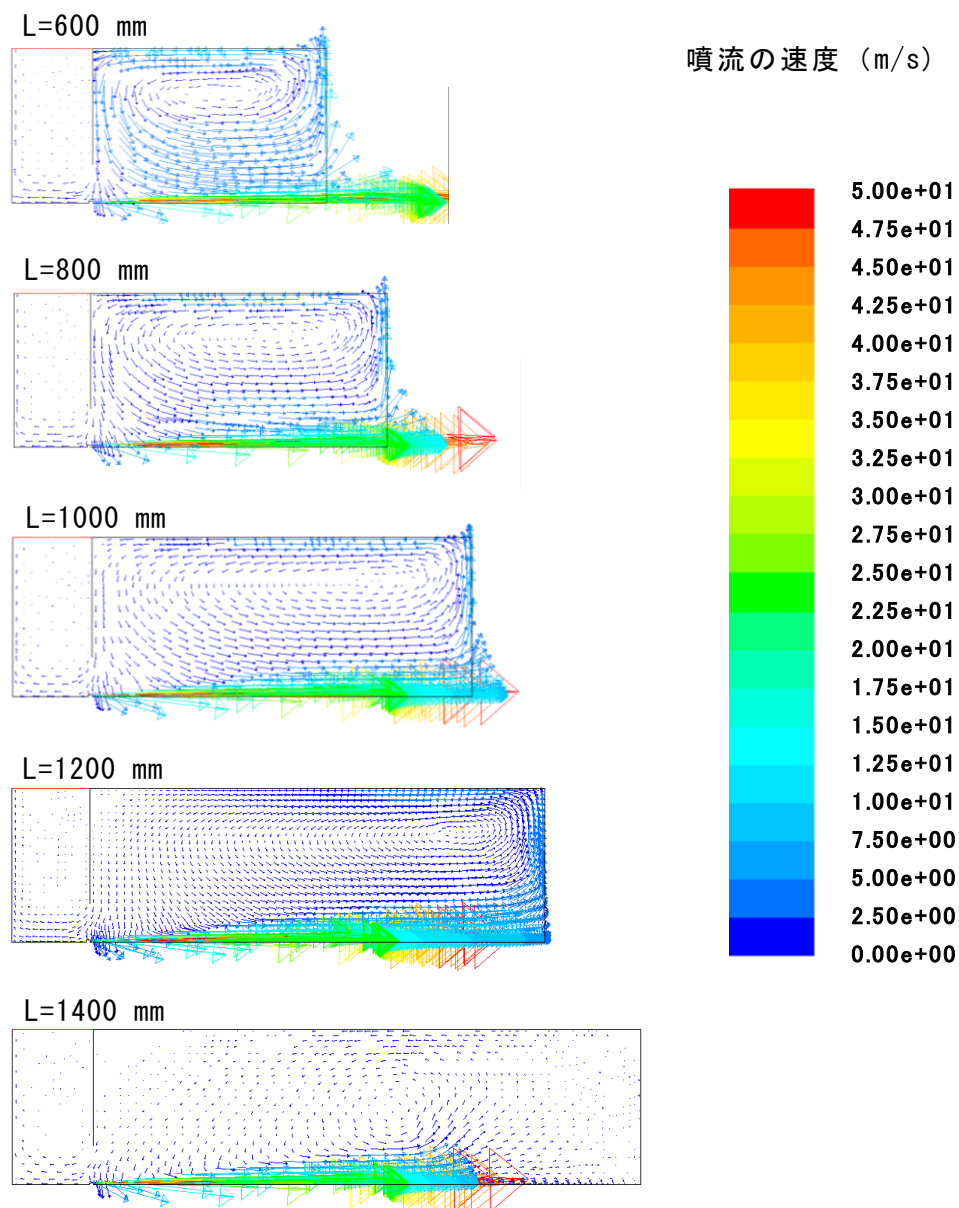


図 4-18 掘削の進行に伴う速度ベクトルの変化

図 4-19 は wall-end に作用する静圧を示している．半径 0m 付近の中央部では噴流による大きな静圧が生じており，図 4-18 から明らかなように中央部で地盤の掘削が進行する．また，半径の拡大にともない静圧は低下し負圧になる．これは，wall-end における放射状の流れにともなう現象で半径方向の慣性力と流体の連続性の維持とが絡み合っ生じるためと考えられる．この流れが wall-side に接近すると，せき止められ再び静圧が上昇する．この圧力は図 4-19 から分るように，D が小さいほど，L が短いほど大きく，地盤の強度以上であれば，掘削面の周縁部が掘削されて，掘削空間の径が拡大する．そのため掘削は，噴流方向と同時に噴流半径方向にも進行する．したがって，ノズル近傍においても径の大きな掘削領域，つまり地盤改良領域を確保することができる．

この現象は，前述の水中における噴流の動圧測定実験のように，境界条件を考慮しない噴流の拡大とは異なり，掘削領域の境界が作る流れと境界に作用する力により掘削が進行することを表している．

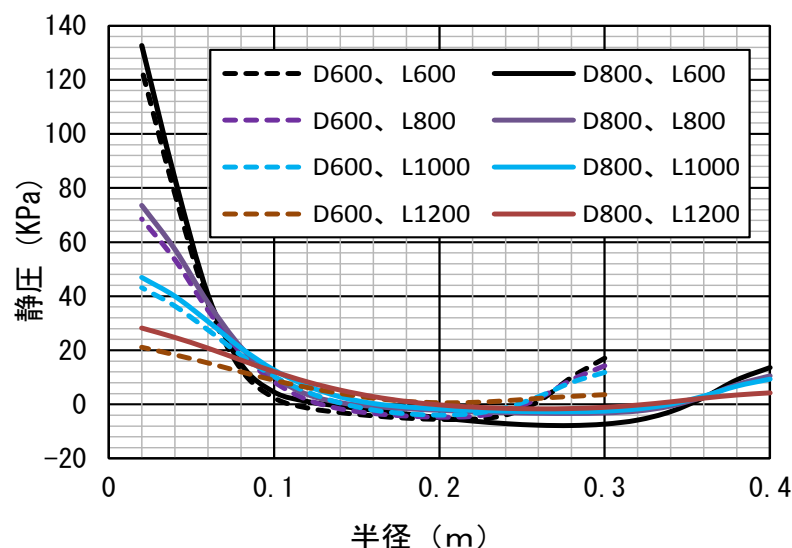


図 4-19 wall-end に作用する静圧

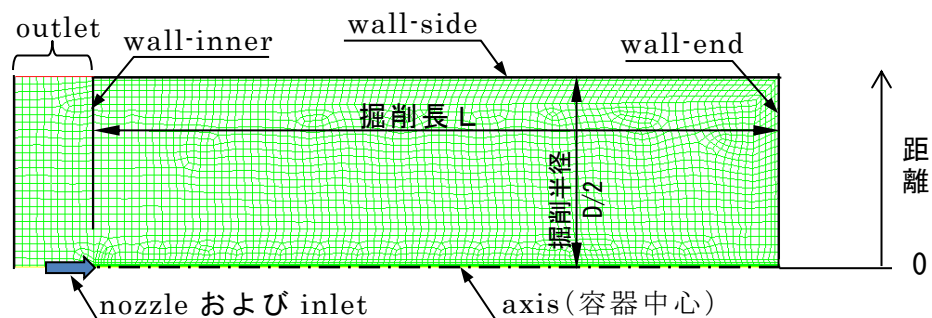


図 4-20 圧力容器と wall-end 端の距離（半径）の関係

### 4-7-3 FVM 解析のまとめ

FVM 解析は実際の現象を精度よく表現できた。水中に噴射された混合噴流は、周囲の水を巻き込み噴流幅が増大すること、噴流は掘削空間内で循環する流れを作り、掘削領域を前方のみならず半径方向にも拡大すること、その結果、ノズルを移動することなく広範囲の地盤改良が可能となることなど、掘削領域の境界である地盤への混合噴流の作用が明らかとなった。

## 4-8 模擬地盤の掘削実験

### 4-8-1 可視化用透明容器の製作

これまでの動圧分布の測定結果から、ノズルを固定して噴射した場合には、掘削径は圧力容器の径より小さくなることが予想される。そこで、掘削過程を可視化する目的で、圧力容器内に小口径の透明なアクリル容器を装着し、その内部に充填した模擬地盤を作り、それを超高圧噴射を用いて掘削して、その状況を外部からビデオで撮影することとした。これにより掘削過程を目視することができ、かつ被圧水下での実験も可能となるが、アクリル容器の適正な大きさが不明なことから、長さは 1500mm とし、内径は 200mm, 300mm, 450mm の 3 種の容器を作製して実験を行った。写真 4-7 は圧力容器内にアクリル容器を挿入している写真である。

### 4-8-2 模擬地盤の作製方法

模擬地盤は、粒度の分類で粘土およびシルト分を含む土を粘性土、砂分を含む土を砂質土として、別途実施した一軸圧縮強度試験結果を参考に、軟弱粘性土相当（以下「軟弱粘性土」と呼ぶ）、粘性土相当（以下「粘性土」と呼ぶ）、固結砂質土相当（以下「固結砂質土」と呼ぶ）の 3 種とし、表 4-3 に示した配合で作製した。このうち固結砂質土地盤は、ミキサーによる混練が困難であるため、まず、セメントミルクを混練し、その中に砂を投入する方法で作製した。写真 4-8 は模擬地盤の作製状況の写真である。

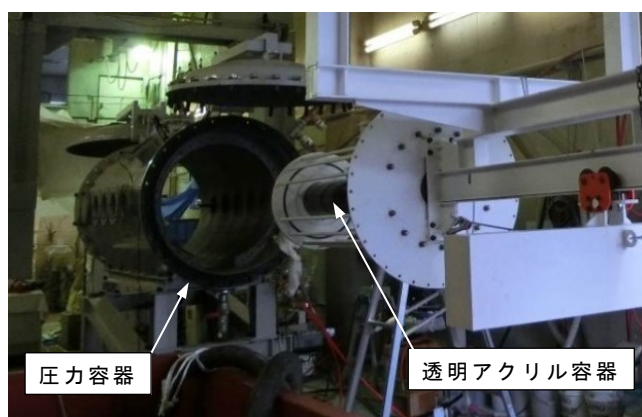


写真 4-7 透明アクリル容器設置状況



写真 4-8 模擬地盤の作製状況

表 4-3 模擬地盤の配合

軟弱粘性土地盤(1m <sup>3</sup> あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	ベントナイト(※1)	計
kg	kg	%	kg	kg
150	902	601	100	1153
粘性土地盤(1m <sup>3</sup> あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	ベントナイト(※1)	計
kg	kg	%	kg	kg
240	866	361	96	1202
固結砂質土地盤(1m <sup>3</sup> あたり)				
シリカヒューム	水	W/C	砂(珪砂5号)(※2)	計
kg	kg	%	kg	kg
116	387	334	1580	2083

※1: 粒度0.005mm以下(粘土): 48%, 0.005~0.045mm(シルト): 51%

※2: 粒度0.15mm~0.6mm(砂)

#### 4-8-3 可視化容器を用いた掘削実験

地盤掘削実験は3種類の模擬地盤に対し、表4-4に示す条件で実施した。

写真4-9は掘削前面の位置のビデオ映像である。また、図4-21および図4-22は、軟弱粘性土地盤、粘性土地盤および固結砂質土地盤について、それぞれの噴射時間と掘削前面の位置との関係を示したものである。これらの図には実験を行う直前に実施した模擬地盤のモールドサンプルの一軸圧縮強さを併記してある。図中には掘削実験を行った模擬地盤の一軸圧縮強さとアクリル容器の

内径を示している． 図 4-21 および図 4-22 からわかるように，いずれの地盤においても，掘削距離が 400mm 程度までは高速で掘削され，600mm 以上になるとその進行が著しく遅くなる．

これは図 4-11 の噴流軸中心部の動圧測定結果によれば，SD=400mm における中心動圧は 100kPa 以上であり，地盤強度の倍以上の圧力となっている一方，SD=600mm では 45kPa で地盤強度と同程度となっていることによると考えられる．中心動圧が地盤強度以下の領域でも掘削は進行しているが，これは流速による洗掘の結果と推測される．いずれの条件でも掘削前面は，写真 4-9 に示すように，ほぼ扁平な形状を維持しながら進行する．

なお，いずれのアクリル容器の径においても，容器の内壁に地盤が残存することなく，外部から掘削の進行状況が観察できた．この結果は，本実験で作製したいずれの模擬地盤でも掘削径が 450mm 以上確保されていることを示している．また，掘進速度に対する容器の径の影響は，地盤強度を考慮すると明確には認められなかった．

図 4-23 は地盤の一軸圧縮強さと噴流の到達距離との関係を示したものである．この図をみると，模擬地盤を作製する際の配合は同じにしても，できあがった地盤の強度にはかなりのバラツキがあるが，地盤の一軸圧縮強さが高くなると，噴流の到達距離はほぼ線形で小さくなることがわかる．到達距離は，一軸圧縮強さが 20kPa 以下の軟弱粘性土地盤では 120cm，一軸圧縮強さが 50kPa 以上の粘性土地盤では 80cm から 100cm，固結砂質土地盤では 130cm から 150cm になる．また，軟弱粘性土地盤および粘性土地盤における到達距離は，固結砂質土地盤と比較すると，地盤強度が同じであっても小さい．これは粘性土地盤の粘着力によるものと判断される．

表 4-4 模擬地盤の掘削条件

項目	条件	単位	設定値
①AJライン	噴射圧力	MPa	1.0
	ノズル径	mm	6.00
	噴射流量	ℓ/min	68.6336
	噴流速度	m/s	44.720
	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>	51.157
②WJライン	噴射圧力	MPa	220.0
	ノズル径	mm	1.35
	噴射流量	ℓ/min	53.5571
	噴流速度	m/s	663.320
	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>	592.096
①+②	運動量流束	kg・m/s <sup>2</sup>	643.253
混合噴流の算定速度		m/s	315.86

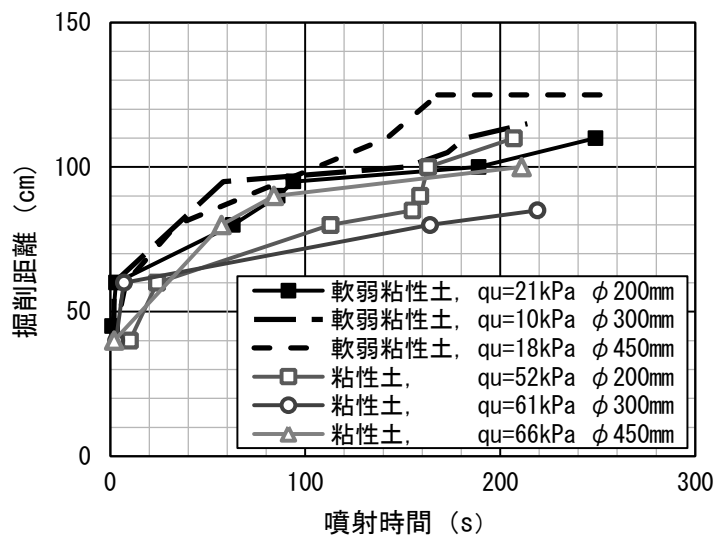


図 4-21 軟弱粘性土地盤および粘性土地盤の掘削距離

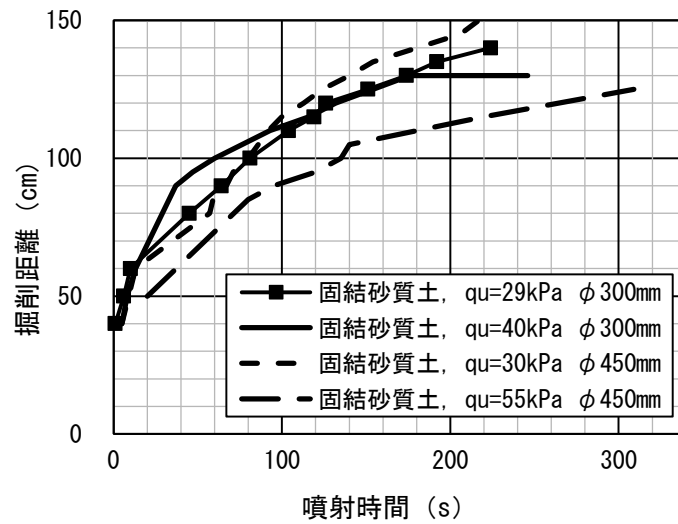


図 4-22 固結砂質土地盤の掘削距離

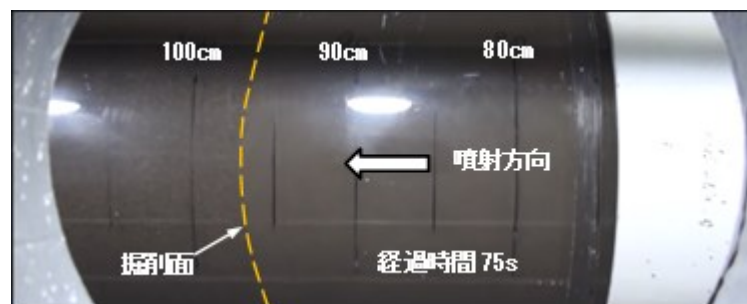


写真 4-9 模擬地盤の掘削状況

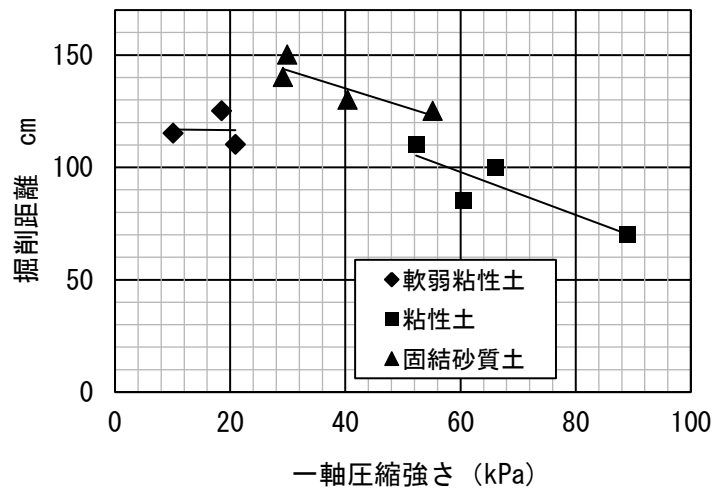


図 4-23 模擬地盤の強度と掘削距離

#### 4-9 混相流モデルによる地盤掘削過程の FVM 解析

地盤の掘削過程を表現するために FVM による非定常解析を行った．表 4-5 は解析に用いたオイラーの混相流モデルの条件を示したものである．解析モデルのメッシュおよびゾーンは図 4-14 と同様である．このモデルは 2 種類以上の相の異なる物質の運動を扱うことができ，例えば，河川による堆積砂の運搬などを容易に解くことができる．

しかし，粘性土地盤や拘束された砂地盤の掘削問題の場合には，粘性や有効応力のモデル化が難しく，破壊現象を扱える構造解析ソフトとの連成解析を行うという困難に直面する．そのため，ここでは掘削過程を定性的に捉えることに主眼を置き，地盤を高粘度の流体と砂の混合物でモデル化して，実験結果を近似できるような粘性係数を逆算した．粒子への運動量の伝達には，抗力係数を用いた．

図 4-24 は掘削の進行状況を体積分率で表した経過時間ごとの解析結果である．体積分率は，地盤を模擬した高粘性流体がどの程度の割合で噴射流体に置換されたかを示す比率で定義した．したがって，粘性流体が完全に置換された場合には，体積分率は 1 となる．この図をみると，噴流が地盤を掘削していく様子がよくわかる．

図 4-25 は体積分率が 95% の場合を掘削範囲と仮定して，掘削前面の位置の進行状況を掘削実験結果と比較したものである．この図をみると，解析結果は，掘削距離の増加とともに掘削の進行速度が低下して行く傾向を概ね表現できしており，混相流モデルは本研究のような問題にも有効な解析手法であると思われる．本研究では，粘度と地盤の種類や地盤強度との関係を定式化するには至



っていないが、粘度が 40 kg/(m・s) から 200 kg/(m・s) の範囲では、ほぼ妥当と思われる結果が得られた。

表 4-5 非定常解析条件

解析コード	ANSYS FLUENT非定常解析		
座標	2次元軸対称		
混相流モデル	Euler-Euler Model		
time step	1s		
密度	高粘性流体	砂(粒径0.5mm)	水
g/cm <sup>3</sup>	1.46	2.15	1
計算領域	直径 mm	長さ mm	
D450	450	2500	
D1000	1000	2500	

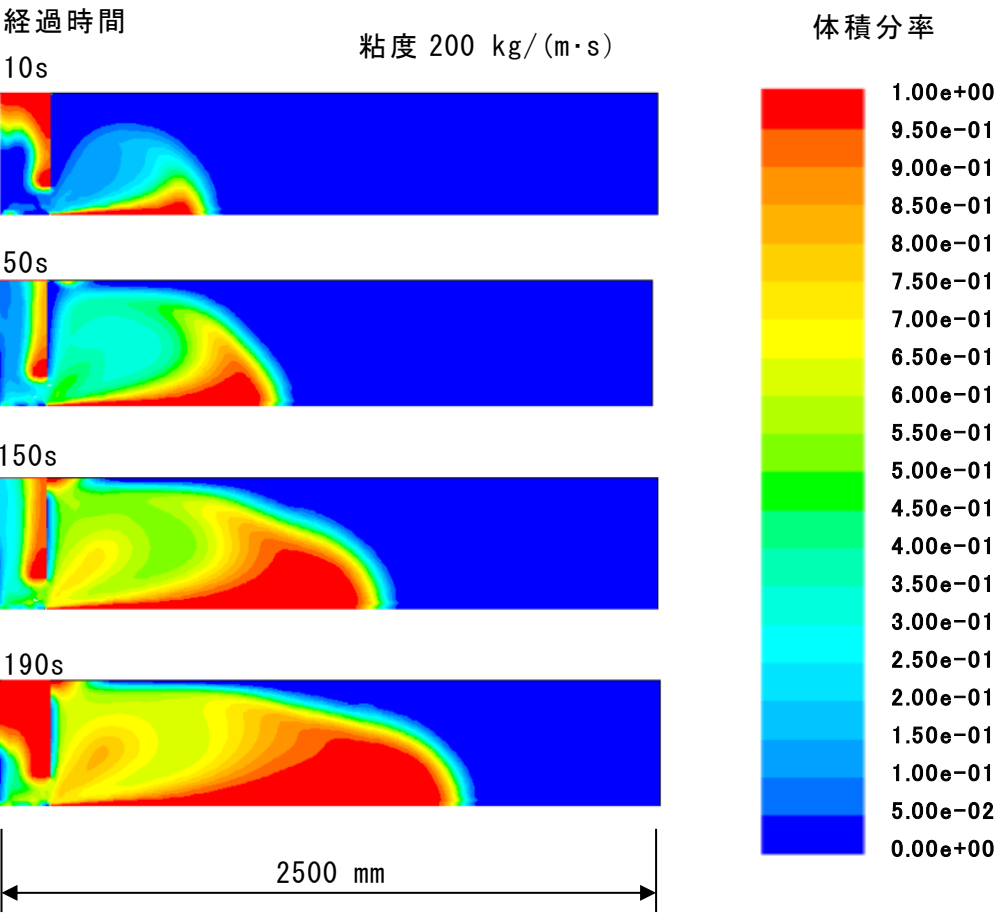


図 4-24 非定常解析結果 (D1000)



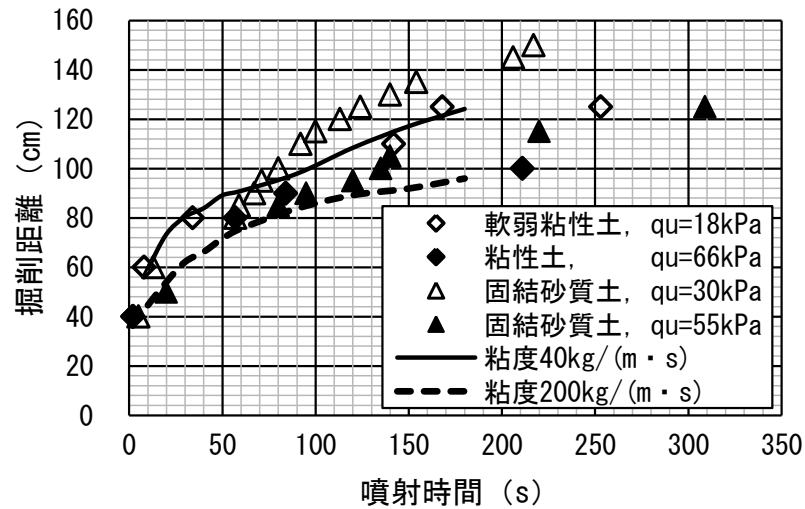


図 4-25 地盤掘削の解析値と実測値

#### 4-10 現状の地盤改良計画の評価

本章「4-8-3 可視化容器を用いた掘削実験」では、2液混合噴流の中心動圧が  $SD=600\text{mm}$  で地盤強度と同程度まで減衰していることが確認された。

また、噴流の到達距離は、粘性土地盤で  $80\sim 100\text{cm}$ 、固結砂質土地盤で  $130\sim 150\text{cm}$  になった。これは、D0-Jet 工法「技術資料」<sup>12)</sup> に記載されている、地盤の土質別の超高圧地盤改良による改良体の計画出来形とほぼ同じ数値を示している。これにより、現状の D0-Jet 工法による地盤改良工が周辺地盤および近接構造物に対して適切に計画・施工されていることが確認できた。表 4-6 に D0-Jet 工法「技術資料」の計画出来形を示す。

表 4-6 土質別の改良体の計画出来形

対象地盤の土質	改良長さ (mm)	改良径 (mm)
砂質土，粘性土①	1,500	$\Phi 800$
粘性土②	1,000	$\Phi 800$

粘性土①：粘着力  $CU < 40\text{KN/m}^2$

粘性土②：粘着力  $CU \geq 40\text{KN/m}^2$

#### 4-11 まとめ

本研究により得られた知見を，2液混合噴流の動圧分布，地盤の掘削実験およびFVM解析についてまとめると，以下のとおりとなる．

##### 4-11-1 2液混合噴流の動圧分布

水中において噴射された混合噴流の動圧は，2液混合ノズル出口から動圧測定位置までの距離SDの増加とともに急激に減少し，SD=100mmではノズルの出口の約1/5に，SD=200mmでは1/10以下になった．一方，噴流幅は，SDの増加とともに周囲の水を取り込み増大する．SD=900mmでは噴流幅はノズルの出口付近の約25倍となった．この結果は，高速でかつ噴流径の小さな流れが，SDの増加とともに低速でかつ噴流径の大きな流れに変化していくことを示している．地盤改良用の混合噴流はAJノズルから噴出した時点で，一般の噴射式地盤改良（ジェットグラウト等）と同程度の圧力となっており，コンクリート構造物を損傷する可能性はない．

##### 4-11-2 地盤の掘削実験

軟弱粘性土，粘性土および固結砂質土のいずれの地盤の場合も，掘削面はほぼ扁平な形状を維持しながら進行する．また，いずれの地盤においてもノズルからの距離が400mm程度までは高速で掘削され，600mm以上では掘削の進行が著しく遅くなる．これは，400mmにおける中心動圧が100kPa以上で地盤強度の倍以上あり，600mmでは45kPaで地盤強度と同程度となっていることによる．

到達距離は地盤強度の増加とともに低下するが，軟弱粘性土地盤および粘性土地盤と固結砂質土地盤を比較すると，同一の地盤強度では軟弱粘性土地盤および粘性土地盤の方が小さい．到達距離は，軟弱粘性土地盤では120cm，粘性土地盤では80cmから100cm，固結砂質土地盤では130cmから150cmになる．

##### 4-11-3 FVM解析

動圧分布の解析値と実測値はほぼ一致した．噴流の流れは前方の壁に衝突し，半径方向に広がり，容器の内壁に沿って戻る．このとき，掘削前面の中央部のみならず周縁部にも静圧が発生する．この圧力により掘削径が拡大する一方，圧力は掘削距離が増加し，掘削径が拡大すると，それにともない低下する．

また，地盤の掘削現象は，地盤を高い粘度をもつ流体に置き換えることにより，オイラーの混相流モデルを用いて表現することができる．

#### 4-11-4 今後の課題

本研究で得られた知見は、2液混合噴流を用いた支障物撤去型掘進工法の実工事適用にあたり、混合ノズルの効率化、改良範囲の推定、近接構造物への影響の評価などに活用できるものと考ええる。

また、現状では動圧分布などの地盤中の挙動や改良範囲について施工中の計測が困難となっている。今後は計測機器の開発を含め、本工法による施工現場での計測および計測データと本研究との比較を研究課題として取り組み、本工法の安全性および施工性の一層の向上を図っていく必要がある。

## 〔参考文献〕

- 1) アブレシブジェット水流で地中障害物を切断除去し推進 東京下水道 第二十二社幹線暫定貯留切替推進工事 宇田川孝之, 吉川静雄, 船越誠, 田村憲 トンネルと地下 Vol. 37, No. 10, pp. 29-35, 2006
- 2) 「D0-Jet 工法」による地中障害物撤去および地盤改良の安全で効率的な施工事例 高橋智, 船橋信行 日本下水道協会 45 回下水道研究発表会講演集 pp. 524-526, 2008
- 3) 既設下水道幹線直下の残置鋼矢板を D0-Jet 工法で切断撤去 東京下水道 王子西一号幹線シールド 家壽田昌司, 千葉正孝, 北原淳 トンネルと地下 Vol. 41, No. 6, pp. 41-48, 2010
- 4) 地下鉄駅直下の残置杭を D0-Jet 工法で切断撤去 東京下水道 東大島幹線および南大島幹線 家壽田昌司, 千葉正孝, 高谷圭吾 トンネルと地下 Vol. 42, No. 2, pp. 41-47, 2011
- 5) D0-Jet 工法による既設下水道管の防護および基礎杭の切断・除去 東京下水道 新宿区河田町市谷本村町付近再構築 武山信幸, 中條明彦, 川元克哉 トンネルと地下 Vol. 47, No. 3, pp. 19-24, 2016.
- 6) 地中支障物対策を駆使したシールド施工 東京下水道 王子西一号幹線 岡本順, 神山守, 坂本久之 トンネルと地下 Vol. 47, No. 8, pp. 59-67, 2016
- 7) D0-Jet 工法が周辺地盤に与える影響についての実験報告 高橋智, 船橋信行 日本下水道協会 46 回下水道研究発表会講演集 pp. 497-499, 2009
- 8) D0-Jet 工法における超高压 2 液混合ジェット噴流の影響範囲に関する実験的研究 神山守, 磯部隆寿, 岩佐行利, 小泉淳 トンネルと地下 Vol. 47, No. 11, pp. 47-52, 2016
- 9) アブレシブジェットを利用した鋼材の水中切断技術の開発 磯部隆寿 鹿島技術研究所年報 第 46 号, 1998
- 10) ジェットグラウト工法技術資料 日本ジェットグラウト協会 pp. 72, 2016
- 11) コンクリート標準示方書 設計編 土木学会 pp. 32, 2012
- 12) D0-Jet 工法技術資料 2012 D0-Jet 工法研究会

## 第5章 2 液混合噴流による地中支障物の切削性に関する研究

### 5-1 本研究の目的

第4章の研究において超高压ジェット噴流の影響範囲などは明らかにすることはできたものの、水圧の高い大深度工事における切削能力や支障物背面への影響などの詳細は把握していないことから、施工の安全性や効率性の視点から実際の現場を想定して調査研究することにした。

### 5-2 高水圧下にある奥行き 300mm を超える支障物に対する D0-Jet 工法の適用性

D0-Jet 工法は、シールド工法または推進工法によるトンネル工事において、これまでに 30 件以上の工事に適用され、安全で確実な工法として実績を上げている。適用工事件数の増加に伴い、大深度および高水圧下等の施工環境下での適用や様々な材質、規模の支障物への対応等、D0-Jet 工法の適応領域や能力拡大のニーズが増加している。

一方、D0-Jet 工法の超高压ジェットシステムにより飽和地盤中で安全確実に切断を可能とする支障物の奥行きは、これまでの実証実験等から鋼材で 300 mm 程度としている<sup>1)</sup>。そのため、300mm を超える支障物に遭遇した場合は、2 回以上の切断・除去作業が必要となり、作業の煩雑・長期化が課題となっている。図 5-1 に D0-Jet 工法による奥行き 300mm を超える支障物切断手順の一例を示す。

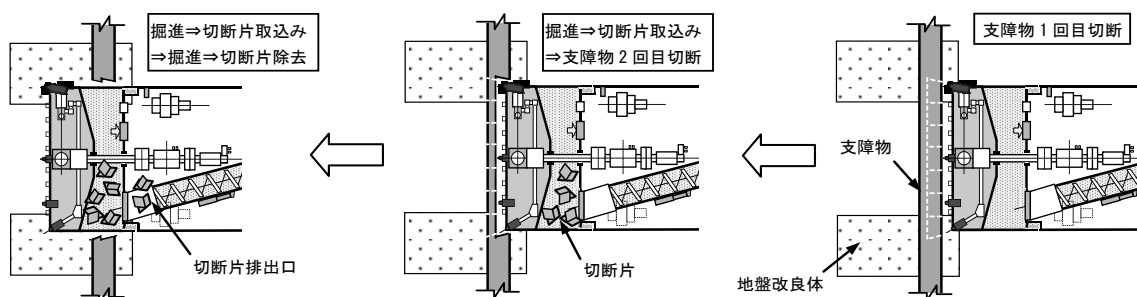


図 5-1 D0-Jet 工法による奥行 300mm を超える支障物切断手順の一例

この課題に対し、切断能力を向上させる方法の一つとして、トンネル掘削中の切羽に限定圧気工法を併用し、気中状態で超高压ジェットにより支障物の切断を行う方法が考えられる。

超高压ジェットの噴射圧力は、D0-Jet 工法に関するこれまでの各種実験により、水中に比べて大気中での低下が少ないことを確認している<sup>2)</sup>。そこで、本実験では 300mm を超える支障物を 1 回で切断する方法の一つとして、限定圧気

により地下水を排除した環境における超高圧ジェットのパフォーマンスを確認する。具体的には、本論文第4章の研究において製作した大型の圧力容器を使用し、その中に支障物が残置されている状態を再現した模擬地盤を作成して、気中と水圧が作用した場合の違いによる切削能力などを実験により調査することとした。

### 5-3 検証実験の概要

本実験は大きく二つの工程に分けて検証実験を行う。

#### (1) 事前実験（実験 case1）

模擬地盤での噴射実験を行う前に、圧力容器内の圧力が切断能力に与える影響、噴射材料が切断能力に与える影響および奥行き 400mm の H 形鋼材（以下、H400 という）を芯材とする口径 600mm の PIP 杭を完全に切断できる適切なノズルの移動速度の把握のための試験を気中環境にて行う。

#### (2) 土中切断および改良体確認実験（実験 case2）

本実験は、限定圧気工法を併用した D0-Jet 工法を実工事に適用することを想定して、圧力容器内の模擬地盤に埋設した PIP 杭の切断状況を確認し、実地盤での切断能力を検証する。実験パラメータは、芯材の配置角度とノズルの移動速度である。また、杭の切断後、杭背面の地盤に充填された切断材をセメント系改良材に置き換えた後の改良体の出来形を確認する実験を併せて行う。

### 5-4 適用性を検証する工事の概要

東大島幹線および南大島幹線は、東京都江東区の大島・小松川ポンプ所流域における雨水量増大に対応するために東京都下水道局が発注した雨水幹線である。本工事は、小松川第二ポンプ所を発進基地として大島ポンプ所までの区間を施工するものである（図 5-2）。

本工事の近接構造物は、中川大橋付近にある水管橋の鋼管杭、大島幹線、都営地下鉄新宿線・東電洞道の築造時に施工され現地に残っている杭（以下「残置杭」という）である。鋼管杭と大島幹線については、幹線通過により管理値以上の沈下影響が発生するため、地盤改良による防護が必要となる。本工事で特に問題となるのは、都営地下鉄新宿線・東電洞道の残置杭であり、施工の支障となるため、撤去が必要となった（図 5-3）。残置杭は H 形鋼と PIP 杭であり、計 48 本が支障となる。

工事箇所は都道丸八通りと新大橋通りの交差点部であり、交通量が多い箇所である。残置杭を撤去する際、既存施設に対する影響を軽減させるため、事前に地盤改良を行う必要があり、地上からの地盤改良の場合は、交通量も考慮す

る必要がある。こうした現場条件を考慮して、安全性・周辺環境・経済性の観点から、本工事ではD0-Jet工法を採用した。なお、シールド通過地点の地盤は、地下水位が高い軟弱な沖積層（有楽町層下部粘性土層）である。

#### 〔工事概要〕

- 工事件名 : 東大島幹線および南大島幹線その3  
工法 : 特殊泥土圧式シールド工法（親子シールド工法）  
東大島幹線 : 口径 6000mm（マシン外径 7100mm, マシン長 13,720mm）  
施工延長 705.20m, 土被り 23.8m～39.9m  
南大島幹線 : 口径 4500mm（マシン外径 5340mm, マシン長 13,315mm）  
施工延長 1,364.75m, 土被り 23.8m～28.2m  
総施工延長 2,069.95m  
土質 : N 値 4～9, 砂質シルト（支障物付近 BorNo.7 の柱状図より）

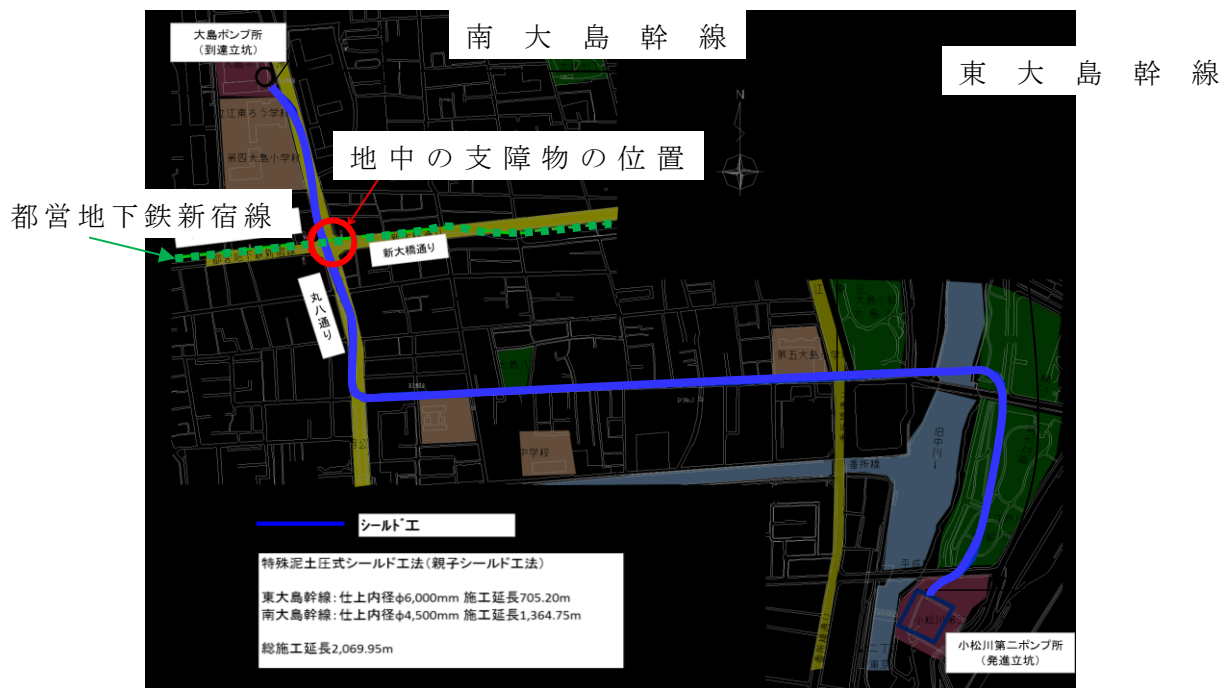


図 5-2 東大島幹線および南大島幹線工事 概要図

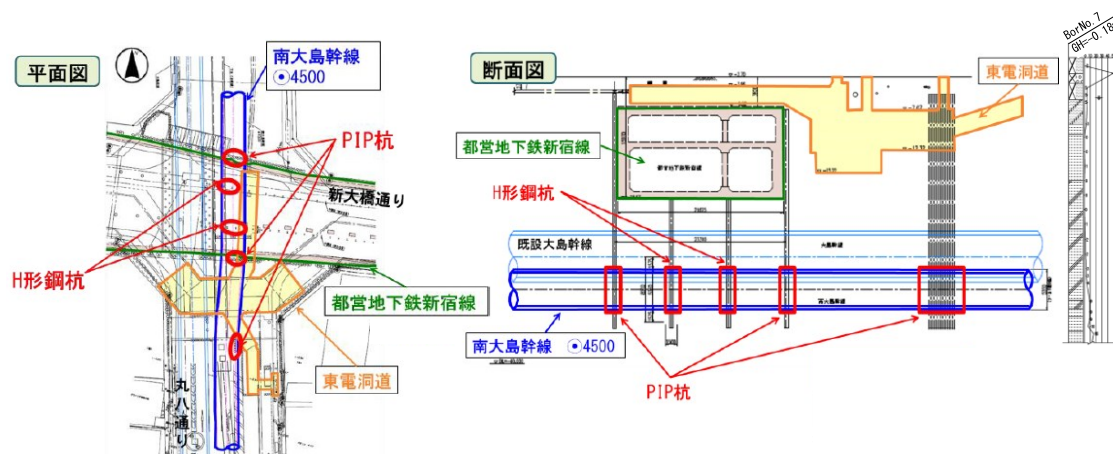


図 5-3 南大島幹線施工における地中の支障物

## 5-5 超高压ジェット噴流の事前の確認実験と考察

### 5-5-1 実験場所および実験装置の概要

実験は、2 回に分けて、それぞれ以下の場所で行った。

1 回目 [実験番号 1-1～1-11, 2-1～2-5]

場所：東大島幹線および南大島幹線工事現場内(東京都江戸川区)

2 回目 [実験番号 2-6～2-7]

場所：N. JET エンジニアリング株式会社 戸出機材センター(富山県高岡市)

### 5-5-2 実験機器

本実験で使用した圧力容器（内径 1000mm×長さ 2949mm，耐圧 0.5MPa）および搭載機器を写真 5-1～5-4 に示す。圧力容器の左右には電動スライダーを搭載しており，その中心に噴射ノズルを設置することで噴射を行いながらノズルを移動する。圧気を行う場合は，圧力容器とコンプレッサーの間に設置したレシーバータンクとマースコントローラーにより，容器内の圧力を均一に保つ。本実験で使用した圧気設備を写真 5-5 に示す。実験用の PIP 杭は H400 を芯材として 口径 600mm で作成した。写真 5-6 に PIP 杭の作成状況を示す。充填用のモルタルの配合は，重量比でセメント：砂＝ 1：1 とした。モルタルの材齢 28 日一軸圧縮強度は 45N/mm<sup>2</sup> 程度である。





写真 5-1 圧力容器外観

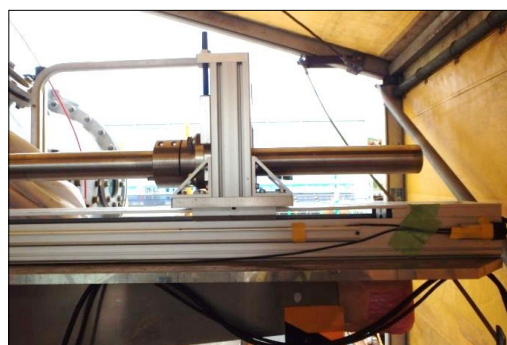


写真 5-2 噴射ノズル移動用電動スライダー

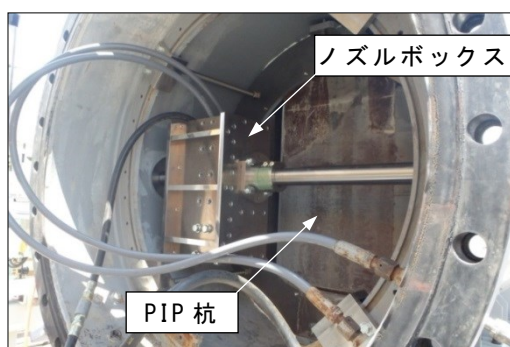


写真 5-3 圧力容器内部およびノズルボックス設置状況



写真 5-4 ノズル設置状況

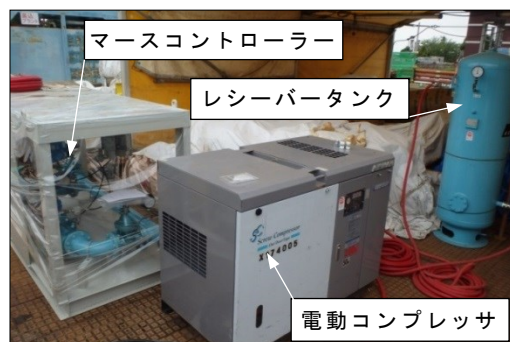


写真 5-5 実験で使用した圧気設備一式



写真 5-6 PIP 杭作成状況

## 5-6 気中環境における切断能力確認実験（実験 case1）

### 5-6-1 実験方法

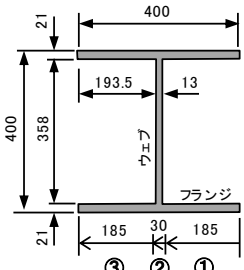
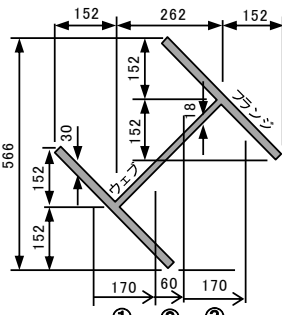
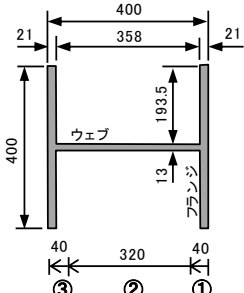
本実験は、次節以降の「5-6-2 圧力容器内の圧力が切断能力に与える影響の把握」～「5-6-4 噴射ノズルの適正な移動速度の把握」の3つの項目の把握を目的に実施する。各項目は、圧力容器内の模擬地盤に設置した PIP 杭の切断実験を行う際のパラメータの設定の参考にするとともに、実験の結果および現象を明確に把握、考察するための事前実験として行う。

切断実験のパラメータは、表 5-2 に示すように圧力容器内の圧力、噴射材料、

PIP 杭の芯材（H 形鋼 400×400）の設置角度，ノズルの移動速度の 4 種類である。

表 5-2 切断実験のパラメータ

実験番号	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10	1-11
圧力容器内の圧力 (Mpa)	0.3	0	0.3								
噴射材料(ゲル化剤の有無)	無	無	有	無							

芯材の設置角度	0度				45度				90度			
PIP杭芯材 (H400) の切断長および切断幅 (mm)												
	③	②	①		①	②	③		③	②	①	
ノズル移動順序	実験番号 ↓	③	②	①	実験番号 ↓	①	②	③	実験番号 ↓	③	②	①
ノズル移動長 (mm)		185	30	185		170(※1)	60	170(※1)		40	320	40
ノズル移動速度 (mm/min)	1-1	120			1-7	20			1-10	3	30	3
	1-2	120			1-8	15			1-11	3	20	3
	1-3	120			1-9	20	5	20				
	1-4	40	5	40								
	1-5	30										
	1-6	20	5	20								

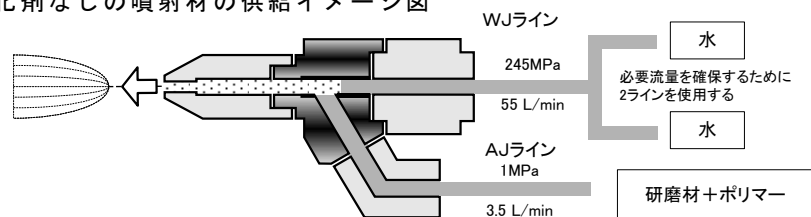
(※1) : 圧力容器内のノズル移動装置の移動範囲の制限により、ノズル移動長を芯材の中心から左右両側に各々200mmに設定した。

また，切断材の噴射条件は表 5-3 に示すように，ジェットライン（以下，WJ ラインと呼ぶ）に珪酸ナトリウム溶液とアプレシブライン（以下，AJ ラインと呼ぶ）に硬化剤を添加し，切断後に切断材がゲル化する D0-Jet 工法の標準的な配合とゲル化剤を含まない配合の 2 種類を設定する．圧力容器内の圧力 0.3MPa は土被り 30m 程度のトンネル掘削を想定して設定した．図 5-4 には噴射ノズルのラインと噴射材料のイメージを示す．

表 5-3 切断材の噴射条件

系統	項目	ゲル化剤無し	ゲル化剤有り (DO-Jet工法の標準設定)
WJライン	噴射材料	清水	珪酸ナトリウム溶液(濃度: 15%)
	噴射圧力	245MPa	245MPa
	噴射流量	55L/min	55L/min
AJライン	噴射材料	ポリマー+研磨材	硬化剤+ポリマー+研磨材
	噴射圧力	1MPa	1MPa
	噴射流量	3.5L/min	5L/min
	ノズル径	4mm	4mm

ゲル化剤なしの噴射材の供給イメージ図



ゲル化剤ありの噴射材の供給イメージ図

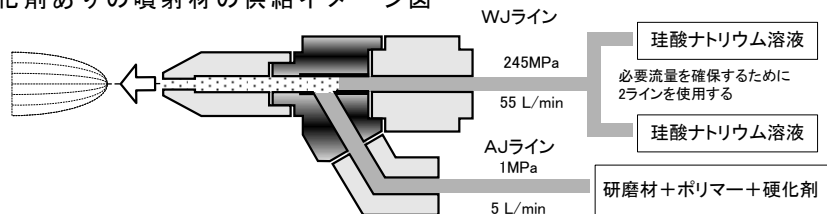


図 5-4 噴射ノズルのラインと噴射材料

なお、掘進機が PIP 杭に遭遇する場合は、様々な角度で芯材を切断することが想定されることから、実験では代表的かつ切断が困難とされる芯材の角度を 0 度、45 度、90 度の 3 つのケースについて実施する。芯材角度の定義を図 5-5 に示す。

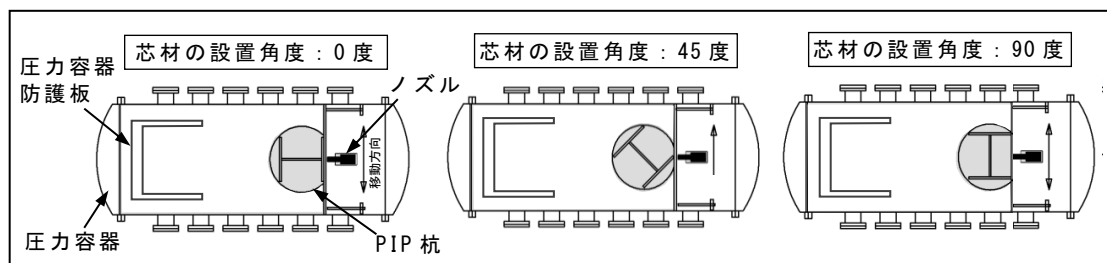


図 5-5 圧力容器内の平面図  
(超高圧噴射ノズルの噴射方向と PIP 杭の芯材の設置角度)

### 5-6-2 圧力容器内の圧力が切断能力に与える影響の把握

圧力容器内の圧力が異なる実験番号 1-1 と実験番号 1-2 の実験結果をもとに、大気圧下と圧気下での切断能力の差異を比較する。PIP 杭を全て切断すると切断能力の比較ができないため、切断距離を PIP 杭のモルタル部分に留め、容器内の圧力の影響および噴射材料の影響を把握するため、ノズルの移動速度を 120mm/min に設定した。

### 5-6-3 噴射材料が切断能力に与える影響の把握

本実験では圧力容器内を 0.3MPa の圧気状態として、噴射材料の異なる実験番号 1-1 と実験番号 1-3 の実験結果を基に、ゲル化剤（珪酸ナトリウム溶液、硬化剤）の有無が切断能力に与える影響の差異を比較する。

通常の支障物切断では、地山の安定確保を目的に支障物背面をゲル化した切断材で充填するため、噴射材量には WJ ラインに珪酸ナトリウム溶液を、AJ ラインに硬化剤とポリマーおよび研磨材を使用している（実験番号 1-3）。

一方、次節の「5-5-4 噴射ノズルの適正な移動速度の把握」では、噴射ノズルの移動速度などをパラメータにして 8 つの実験を気中環境で行うため、通常用いる切断材の配合では、実験の度にゲル化して圧力容器内に付着・堆積した切断材の清掃に多くの時間を要することになる。このため、実験に要する時間を有効に使うことと、使用材料を無駄なく有効に使うことを目的に、噴射材料には WJ ラインに清水を、AJ ラインにポリマーと研磨材を使用することとした（実験番号 1-1）。

両者の切断能力を把握し、その後の実験の参考とするため、噴射材料が切断能力に与える影響の差異を確認する。WJ ラインの流量は、切断能力の比較を正確に行うために、両者ともに通常用いる 55L/min（245MPa）に設定し、AJ ラインは WJ ラインの流量に対して研磨材の配合割合を一定にするため流量を調整した。

### 5-6-4 噴射ノズルの適正な移動速度の把握

既往の実験<sup>2)</sup>より大気中で D0-Jet ノズルを 20mm/min で移動させた場合、H400 を芯材とする口径 600mm の PIP 杭を完全には切断できないことが確認されている。本実験ではこの結果を踏まえて、口径 600mm の PIP 杭を切断する最適なノズルの移動速度を決定する。

これらの結果より、土中切断および改良体確認実験のノズル移動速度を決定する。

## 5-6-5 実験結果

### 5-6-5-1 容器内の圧力が切断能力に与える影響

図 5-6 に実験番号 1-1 と 1-2 の実験結果を示す。切削の先端は、予定したとおり背面側 H 鋼フランジの手前のモルタル内に留めることができた。切削深さは、噴射側 H 鋼フランジ側からノズルの移動方向に沿って 20mm ピッチで探針を行った。実験番号 1-1 と実験番号 1-2 を比較した結果、圧気下での噴射の方が、切削深さが浅い。これは圧気下での噴射は大気圧下に比べて空気による抵抗が大きいため切断能力が低下したと考えられる。

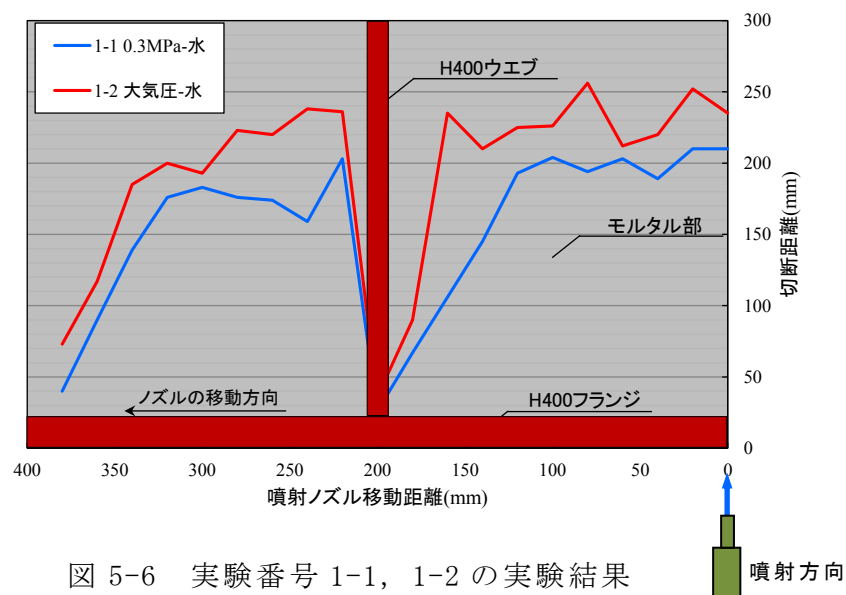


図 5-6 実験番号 1-1, 1-2 の実験結果

### 5-6-5-2 噴射材料が切断能力に与える影響

図 5-7 に実験番号 1-1 と実験番号 1-3 の実験結果を示す。切断深さは、「5-6-5-1 容器内の圧力が切断能力に与える影響」と同様に 20mm ピッチで探針を行った。

実験番号 1-1 と 1-3 を比較した結果、噴射材料に珪酸ナトリウム溶液と硬化剤を使用した実験番号 1-3 の方が、切削深さが浅い。切断能力は噴流速度に大きく依存するため、AJ ラインの流量が多い実験番号 1-3 の方が噴流速度の低下量が大きく切断能力に差異が生じたと考えられる。

PIP 杭の切断は、鋼材とモルタルの異種材料を切断することになる。そこで切断能力を単純化するために鋼材（フランジ厚 = 21mm）をモルタルに換算して評価を行う。図 5-8 に鋼材の切断距離をモルタルの切断距離に換算した場合の実験結果を示す。鋼材の換算切断距離  $t$  は、過去の実験データ<sup>3)</sup>を参考に

$t=10s$  ( $s$ : 鋼材の厚さ)とした。

鋼材をモルタルに換算後の切断距離は、圧気下の噴射が大気圧下に対して 1 割程度の少ない結果となった。また、切断材をゲル化するために通常使用する珪酸ナトリウム溶液と硬化剤を添加した噴射材料による切断距離は、添加しない噴射材料に対して切断距離が 2 割程度少ない結果となった。

これらの傾向を踏まえた上で、次節の「5-6-5-3 噴射ノズルの適正な移動速度の把握」で噴射ノズルの適正な移動速度を把握するために実験番号 1-4～1-11 の実験を行った。なお、図 5-8 に示すようにウェブ付近に切断能力の低下現象がみられる。これはウェブの通過前、通過中および通過後で噴流の流れが変化したために生じたと考えられる。

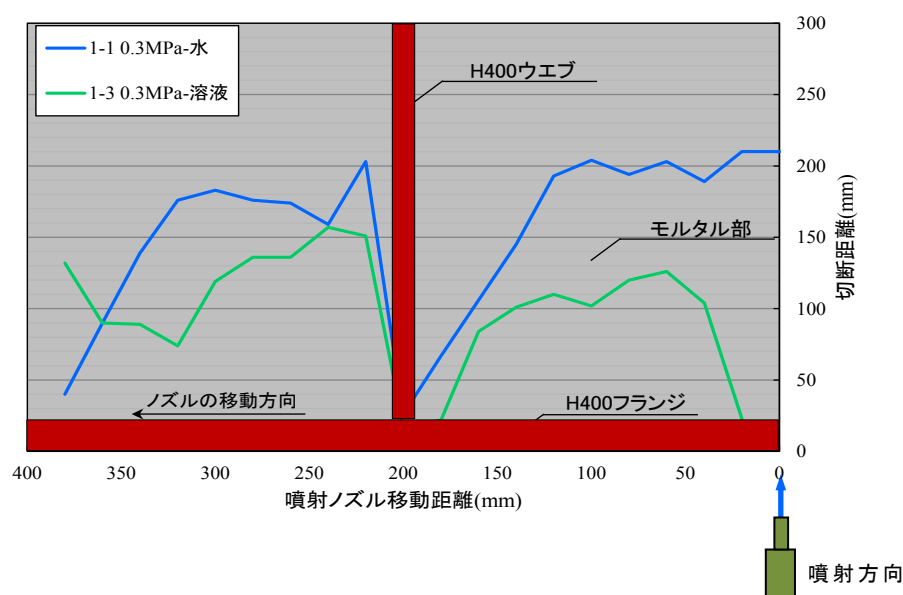


図 5-7 実験番号 1-1, 1-3 の実験結果

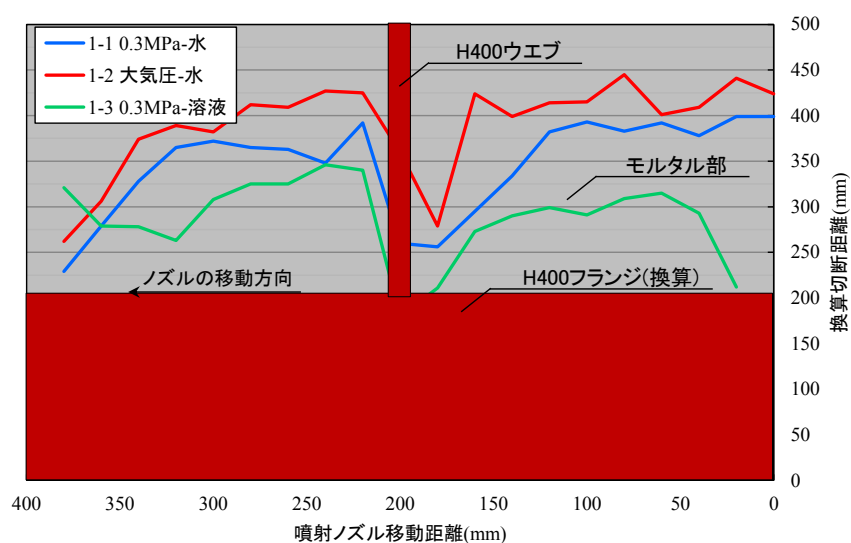


図 5-8 切断距離換算後の実験番号 1-1～1-3 の実験結果

一般に超高压ジェットにより対象物を切削する場合の断面は、図 5-9 に示すような過程となる。切削面は超高压ジェットが対象物を切削している面で、ノズルとともに移動する。切削面において、超高压ジェットが対象物に衝突する位置はノズルの位置と一致するが、対象物から噴出する位置にはズレが生じる。このズレ量はノズルの移動速度が速いほど、材料の強度が高いほど大きくなる。一定以上のズレ量を残しながらノズルが対象物を通過する際は、ノズルの通過による残存領域が必ず発生する。ウェブを通過する前後ではこのズレの影響が顕著に表れ、ウェブ付近の切断能力が低下したものと考えられる。

以降には、こうした超高压ジェットの切削過程を前提として実験結果を整理した。

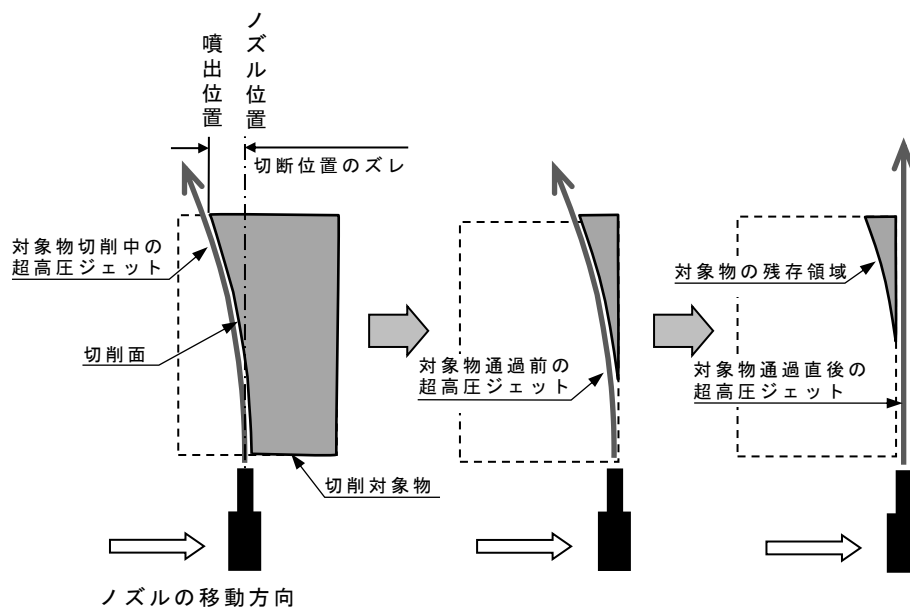


図 5-9 超高压ジェットによる対象物の切削過程

### 5-6-5-3 噴射ノズルの適正な移動速度の把握

#### 1) 芯材の設置角度 0 度の切断結果

実験後の PIP 杭の状況を写真 5-7 に示す。実験番号 1-4 のノズルの移動速度が最も速い 40 mm/min では、背面側のフランジの一部に切断箇所が確認できた。実験番号 1-5 のノズルの移動速度 30mm/min では、さらに切断箇所が増加し、実験番号 1-6 の 20mm/min では切断箇所が連続するに至り、芯材のほぼ全幅の切断が確認できた。なお、ノズルの移動速度 30mm/min, 40mm/min は、ウェブを越えた後半部で切断状況が確認できたために切断材の噴射を停止したことにより切断位置が異なっている。



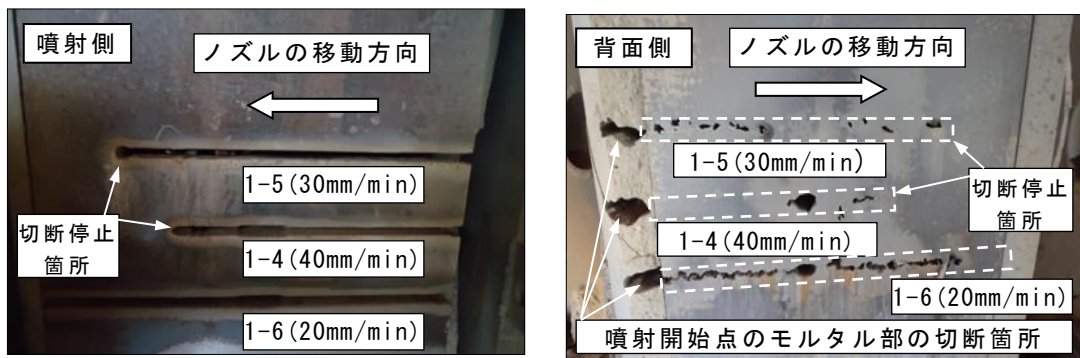


写真 5-7 芯材の設置角度 0 度の切断結果

図 5-10 に芯材の設置角度 0 度の切断面を示す．斜線の部分が切削されている部分である．ノズルの移動方向は矢印で示している．実験番号 1-4 と 1-6 はウェブを中心とする幅 30mm の範囲を低速移動しており，その効果でウェブのほとんどが切削されている．実験番号 1-5 は 30mm/min で等速移動しているため切削深さは 105mm 程度であるが，ウェブの左側に全長にわたって切削溝がある．この溝は，ノズルがウェブを通過した際に形成されたものではなく，通過後にモルタルの切削線に誘導された流れがウェブに角度を持って衝突することにより生成される．ノズルから距離のある部分の溝が深いのは，切削線とウェブのなす角度がより大きくなるためと考えられる．この現象は鋼材がモルタルで囲まれた PIP 杭のような場合に，噴流軸と平行な部材に生じるものと考えられる．

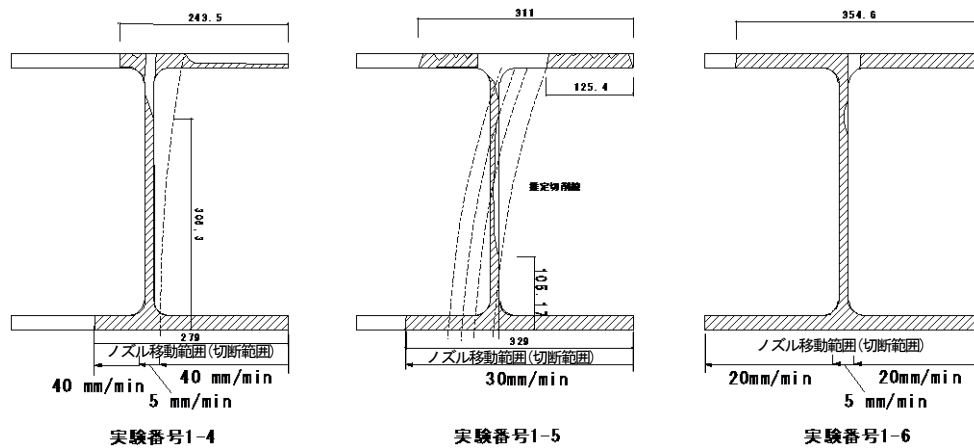


図 5-10 芯材の設置角度 0 度の切断面図

## 2) 芯材の設置角度 45 度の切断結果

実験後の PIP 杭の状況を写真 5-8 に示す．実験番号 1-7, 1-8 は，ノズルの移動速度を切断範囲内で均一として，それぞれ 20mm/min, 15mm/min の速度で切断実験



を行った。実験番号 1-9 は、芯材の中心部 60mm 区間を 5mm/min の速度設定として、その両側を 20mm/min の速度で切断実験を行った。

ノズルから 500mm 以上の位置にあるフランジは、完全に切断するまでに至っていないものの切削の進行が確認できた。また、背面側の写真のうち、モルタルが残存している箇所は、全てのケースでウェブ全幅の切断が確認された。

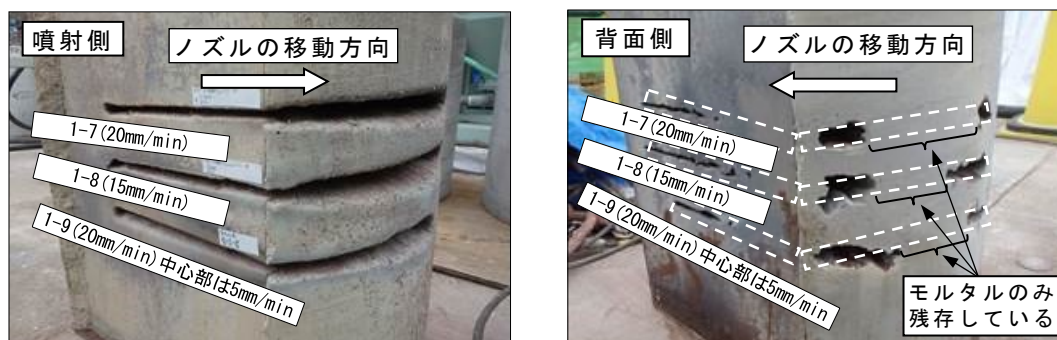


写真 5-8 芯材の設置角度 45 度の切断結果

図 5-11 に芯材の設置角度 45 度の切断面を示す。背面側フランジの端部付近は、ノズルからの距離の増加に伴い噴流速度が低下するため、部分的に切削されているものの切断には至っていない。しかし、部分的な切削は、この部分に噴流の切削能力が到達していることを示している。したがって、ノズルの移動速度を低下させることにより切断が可能となる。実験番号 1-9 では中央部の移動速度を 5mm/min と遅くしたが切削線のズレにより背面側のフランジの切断に至っていない。背面側フランジ端部の切断には、ウェブ切断とモルタル切削による切断位置のズレを考慮して、ノズルの移動速度の切り替えを設定する必要がある。

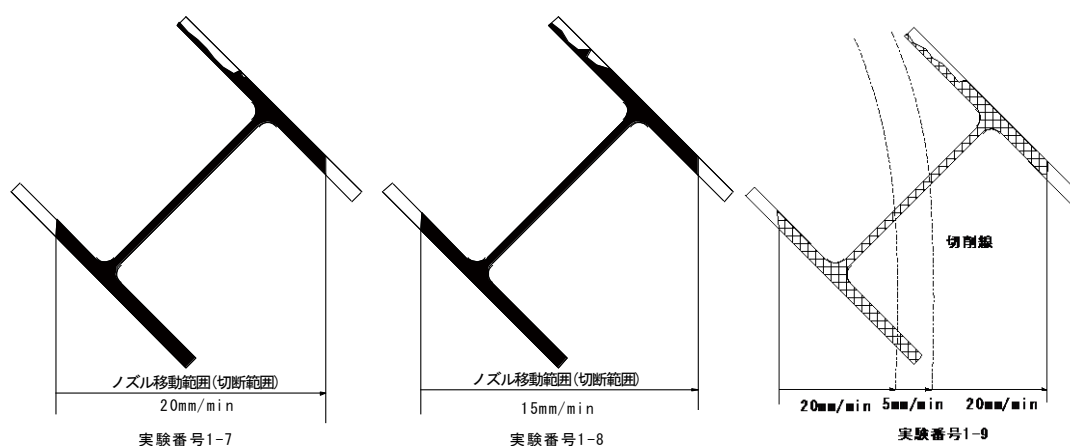


図 5-11 芯材の設置角度 45 度の切断面図

### 3) 芯材の設置角度 90 度の切断結果

フランジは実験番号 1-10, 1-11 ともノズルの移動速度を 3mm/min に設定し，ウェブは実験番号 1-10 が 30mm/min，実験番号 1-11 が 20mm/min として切断実験を行った．実験後の PIP 杭の噴射側および切断開始点側のフランジ面の切断状況を写真 5-9 に示す．ウェブは，ノズルの移動速度が速い実験番号 1-10 の 30mm/min においても切断できた．一方，実験番号 1-10，1-11 ともフランジの背面側に芯材の残存箇所が確認された．

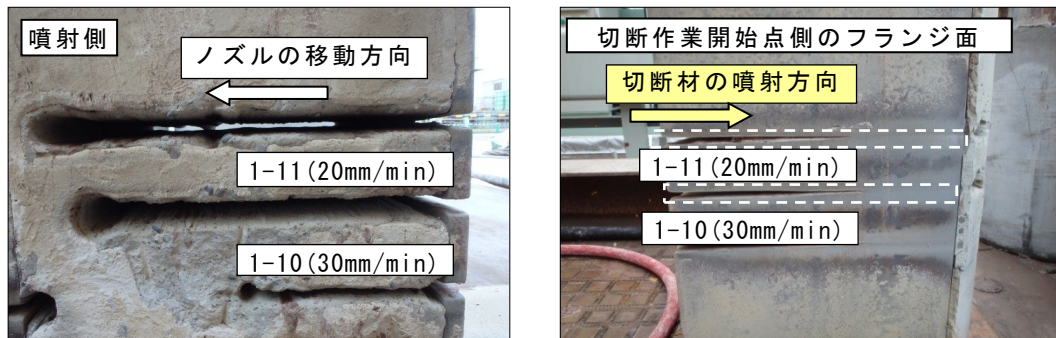


写真 5-9 芯材の設置角度 90 度の切断結果

図 5-12 に芯材角度 90 度の切断面を示す．ウェブは実験番号 1-10 の 30mm/min でも切断することができた．しかし，ノズルの噴射方向に対して水平に芯材が位置するフランジの部分には切残しが確認された．フランジ奥の左側の切削溝は図 5-10 で示したモルタル部の切削線に誘導された流れによるものである．フランジ部を切断するためには，定点噴射や 2 回切断などの工夫が必要である．

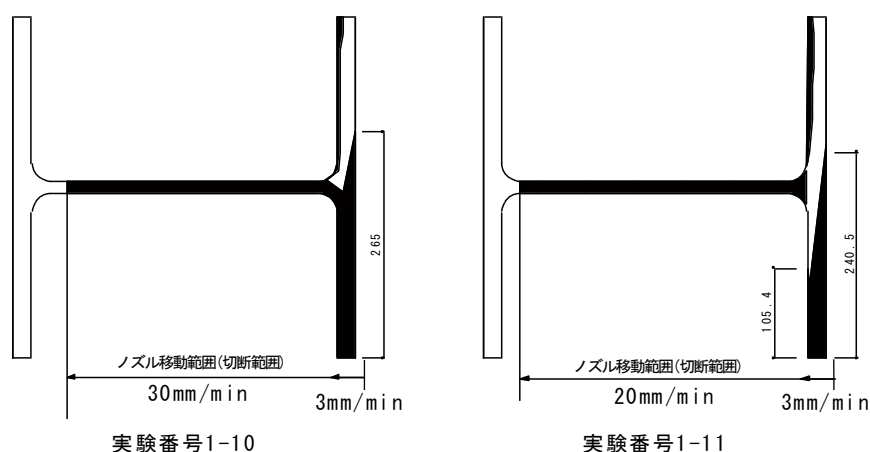


図 5-12 芯材の設置角度 90 度の切断面図

## 5-7 気中環境における切断能力確認実験のまとめ

本実験で得られた知見を以下に述べる．

- (1) 圧気状態の気中では，水中で噴射する超高压ジェットに比べてノズルからの距離の増加に伴う切断能力の減衰が小さいため，より速い速度で，より奥行きのある支障物を切断することができる．
- (2) 圧気状態の気中では，ノズルの移動速度を的確に設定すれば，ノズルから噴射方向に向かって600mm程度まで離れた位置の鋼材を切削する能力がある．
- (3) 切断位置のズレに伴うノズル通過による残存部は，超高压ジェットの切削過程から必然的に生じる．残存部の縮小を図るには，ノズルの移動速度を下げることやノズルの移動を一時停止して切断する方法などが有効である．
- (4) PIP杭の芯材の設置角度0度のウェブおよび芯材の設置角度90度のフランジのように噴流軸と平行な部材は，モルタル部の切削線に誘導された噴流により切削される場合がある．
- (5) 0.3MPaの圧気状態での切断距離は，大気圧下に対して1割程度少ない．
- (6) 0.3MPaの圧気状態で，切断材をゲル化するために通常使用する珪酸ナトリウム溶液と硬化剤を添加した噴射材料による切断距離は，添加しない噴射材料に対して2割程度少ない．
- (7) 噴射方向と H400 のフランジあるいはウェブが垂直になる場合は，飽和地盤中に比べて 2 倍以上のノズルの移動速度で切断が可能である．

## 5-8 土中切断および改良体確認実験（実験 case2）

### 5-8-1 実験方法

本実験では，限定圧気工法を併用した D0-Jet 工法の実工事への適用を想定して，圧力容器内の模擬地盤に埋設した PIP 杭の切断状況を確認し，地盤中の切断能力を検証する．また，圧気状態の切断では背面地盤が広範囲に掘削され，ゲル状の切断材の充填が不完全になる恐れがあるため，杭の切断後，杭背面の地盤に堆積したゲル状の切断材をセメント系改良材に置き換えたうえで，改良体の出来形を確認する．

模擬地盤は，有楽町層下部粘性土層に分布する N 値 4 程度の粘性土地盤中の支障物切断工を想定し，一軸圧縮強さ  $100\text{kN/m}^2$  程度を目標に製作した．ここで，N 値から一軸圧縮強さ  $q_u$  の換算値は，竹中・西垣の推定式  $q_u = 25 \sim 50N$  ( $N > 4$ ) を用い，一軸圧縮強さが最も低く，安全側の検討となる数値とした．

表 5-4 に模擬地盤の標準配合を，表 5-5 に土中切断および改良体確認実験の噴射条件を示す．PIP 杭切断時の噴射条件は，D0-Jet 工法の標準設定として実験 case1 に適用した「ゲル化剤有り」と同じ条件を適用する．

また，杭背面の改良時の噴射条件は地盤改良時の D0-Jet 工法の標準設定を適用する．圧力容器内の圧力は，実験 case1 と同様に  $0.3\text{MPa}$  に設定する．

なお，圧力容器の噴射側と容器の上部から圧縮空気を供給するため，模擬地盤の上部においては  $50\text{mm}$  程度の空隙を残すこととした．

表 5-4 模擬地盤の標準配合

(1m <sup>3</sup> あたり)				
シリカゲル	水	W/C	ベントナイト	計
kg	kg	%	kg	kg
300	873	291	70	1243

表 5-5 土中切断および改良体確認実験の噴射条件

系統	項目	PIP杭切断時	PIP杭切断後の杭背面の改良時
WJライン	噴射材料	珪酸ナトリウム溶液(濃度:15%)	珪酸ナトリウム溶液(濃度:20%)
	噴射圧力	245MPa	245MPa
	噴射流量	55L/min	55L/min
AJライン	噴射材料	硬化剤+ポリマー+研磨材	セメントミルク
	噴射圧力	1MPa	10MPa
	噴射流量	5L/min	70L/min
	ノズル径	4mm	6mm
圧力容器内の圧力		0.3MPa	0.3MPa
改良材の総噴射量			250L(125L/min×2min)

PIP 杭の切断能力は、実験 case1 の「5-6-5-2 噴射材料が切断能力に与える影響」の結果より、ゲル化剤有りの切断材がゲル化剤無しに対し、切断距離が約 2 割短くなる。また、模擬地盤内の気中切断により切断能力がさらに低下すると考えられる。

以上を考慮し、ノズルの移動速度を設定した。

表 5-6 に PIP 杭切断時の実験 case1 と実験 case2 のノズルの移動速度の比較値を示す。実験 case1 のノズルの移動速度は、芯材の設置角度ごとに最も移動速度の遅いパラメータの実験番号を挙げた。

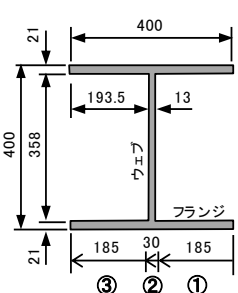
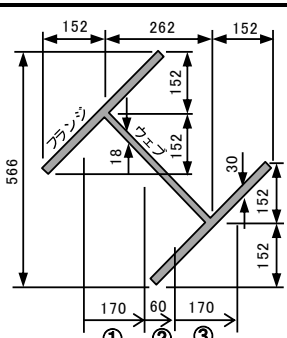
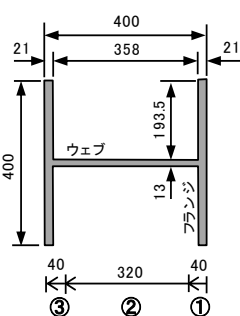
芯材の設置角度 0 度および 45 度のノズルの移動速度比は、case1 に対して case2 では 50% 程度まで減じた。一方、設置角度 90 度のフランジ部の切断時は、本実験で使用した装置でノズルの移動速度が最も遅い設定として、case1 と同じ 3mm/min とした。表 5-7 に、PIP 杭の切断時と杭背面の改良時の実験のパラメータを示す。

表 5-6 PIP 杭切断時のノズルの移動速度の比較

芯材設置角度	0度				45度				90度			
ノズル移動長(mm)	実験 番号 ↓	185	30	185	実験 番号 ↓	170(※1)	60	170(※1)	実験 番号 ↓	40	320	40
ノズル移動速度 (mm/min)												
実験case1	1-6	20	5	20	1-9	20	5	20	1-11	3	20	3
実験case2	2-1	10	3	10	2-2	10	3	10	2-3	3	15	3
速度比(case2/case1)		0.5	0.6	0.5		0.5	0.6	0.5		1.0	0.75	1.0

(※1): 圧力容器内のノズル移動装置移動範囲の制限により、ノズル移動長を芯材中心から両端部までを各々200mmに設定した。

表 5-7 PIP 杭の切断時と杭背面の改良時の実験パラメータ

芯材設置角度	0度			45度			90度						
PIP杭芯材 (H400) の 切断長 および 切断幅 (mm)													
	ノズル移動順序	実験 番号 ↓	③	②	①	実験 番号 ↓	①	②	③	実験 番号 ↓	③	②	①
	ノズル移動長(mm)		185	30	185		170(※1)	60	170(※1)		40	320	40
	ノズル移動速度 (mm/min)												
上段: 切断時	2-1	10	3	10	2-2	10	3	10	2-3	3	15	3	
下段: 改良時		200				200				200			

(※1): 圧力容器内のノズル移動装置移動範囲の制限により、ノズル移動長を芯材中心から両端部までを各々200mmに設定した。

PIP 杭背面の改良時のノズルの移動速度は、芯材の角度 0 度、45 度、90 度とも 200mm/min とした。ノズルの移動速度は、PIP 杭切断による杭背面地盤の掘削部の容積を  $0.24\text{m}^3$  と想定し、掘削部に堆積した切断材の置換えに必要な改良材の量を 250L ( $125\text{L}/\text{min} \times 2\text{min}$ ) として設定した。ここで、杭背面地盤の掘削部の容積  $0.24\text{m}^3$  は、ノズルの水平移動距離を 0.4m、上下方向の掘削想定高さを 0.5m、杭背面から奥行き方向の想定掘削長を 1.2m として算出した。また、ノズルの移動速度 200mm/min は、水平移動距離 400mm を改良材の噴射時間 2min で除して算出した。

## 5-8-2 実験結果

### 5-8-2-1 PIP 杭の切断状況の確認

#### 1) 芯材の設置角度 0 度における芯材の切断結果（実験番号 2-1）

実験後の PIP 杭の切断状況を写真 5-10 に、芯材の切断状況を図 5-13 に示す。フランジは、噴射側、背面側ともに切断されており、実験 case1 の実験番号 1-6 とほぼ同様の切断形状であった。

ウェブは、図 5-13 の切断面図が示すように噴射側から約 200mm まで切断されていたが、200mm 以降は切断に至っていなかった。

ウェブは、実験 case1 の実験番号 1-5 および 1-6 に見られるように、モルタルの切削線に誘導された噴流がウェブの奥側に衝突し切削することが確認されているが、本実験ではその現象の跡が見られなかった。これは、フランジ、ウェブともノズルの移動速度を実験番号 1-5 および 1-6 に比べて 50%程度またはそれ以上に低く設定したために、切断位置のずれ量が少なかったことが考えられる。



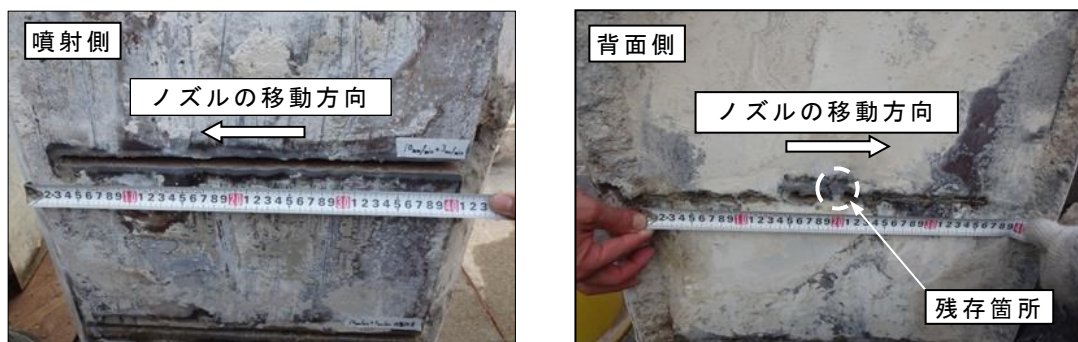
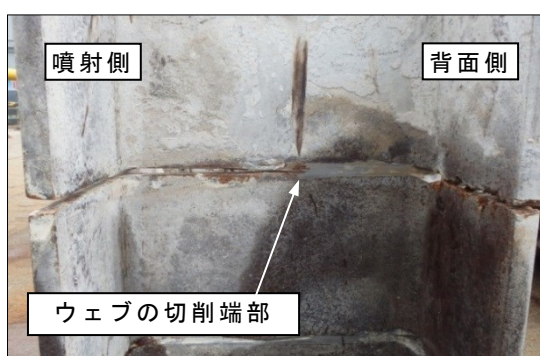


写真 5-10 芯材の設置角度 0 度の切断結果



芯材を右側面側から撮影

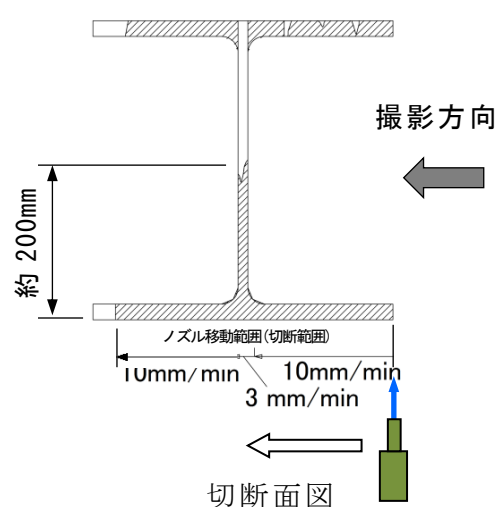


図 5-13 芯材の設置角度 0 度の切断状況

## 2) 芯材の設置角度 45 度における芯材の切断結果（実験番号 2-2）

実験後の PIP 杭の切断状況を写真 5-11 に、芯材の切断状況を図 5-14 に示す。ノズルの移動速度は、2 枚のフランジとウェブの合計 3 枚の鋼材が位置する中心部の幅 60mm 区間を 3mm/min とし、その他の区間は 10mm/min とした。

写真 5-12 の背面側からの写真では、モルタル部分が幅広く残存しており、外観からでは芯材の中心部付近が切断に至っていないように見受けられる。しかし、図 5-14 の切断面図からは、ウェブが全て切断できたことが確認でき、ノズルを 3mm/min の低速で移動した結果が寄与している。

一方、奥側フランジ端部の手前付近のモルタルが深くえぐられ、そこから先のモルタルが切削されていない状況が確認できた。これは、ノズルの移動速度を 3mm/min から 10mm/min に切り替えたことによる切断位置のズレと既切削部への噴流軸の偏向が相まって、そこから先のモルタルの切削に至らなかったためと考えられる。



写真 5-11 芯材の設置角度 45 度の切断結果

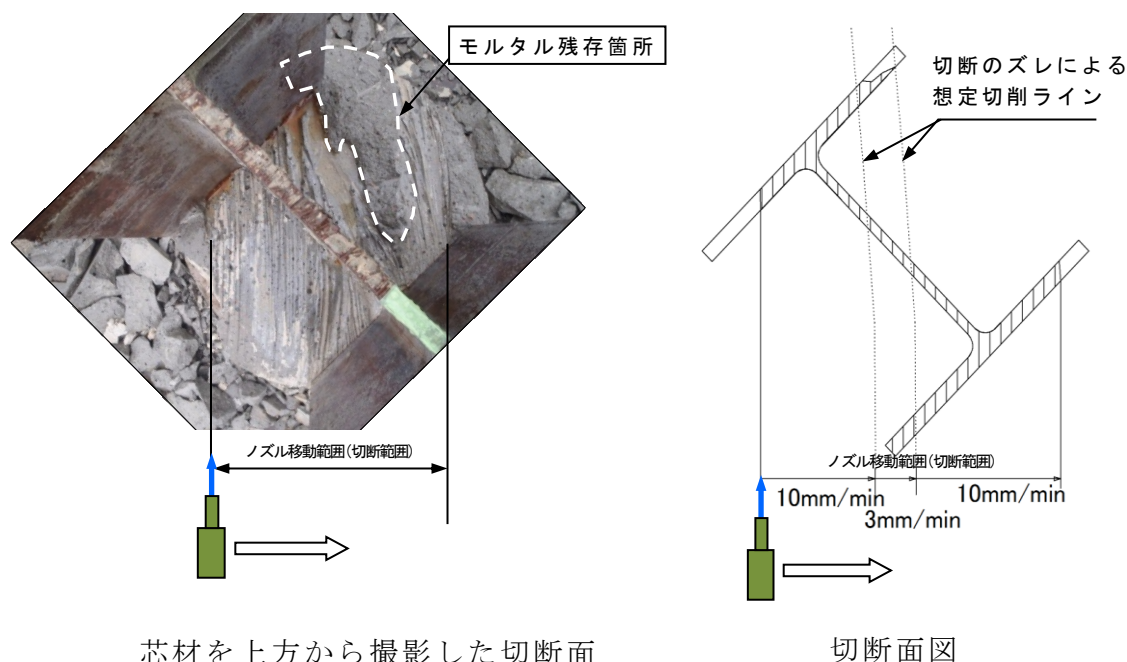


図 5-14 芯材の設置角度 45 度の切断状況

### 3) 芯材の設置角度 90 度における芯材の切断結果（実験番号 2-3）

実験後の PIP 杭の切断状況を写真 5-12 に、芯材の切断状況を図 5-15 に示す。ノズルの移動速度は、ノズルの噴射方向と平行をなすフランジ部分を 3mm/min とし、その他のウェブ区間は 15mm/min とした。

ウェブは、写真 5-12 の背面側および図 5-15 の切断面からも切断したことが確認できた。一方、フランジは、写真 5-12 外観からは推察できなかったが、切断面図より出発点側フランジの背面内側が切削されていることが確認できた。これは、フランジとウェブの交差する T 字の肉厚部を切断する際に切断のズレにより噴流軸が偏向し、フランジの内側を切削したと考えられる。



また、切削跡がフランジの端部まで残っていることから噴流軸と平行をなすフランジの長さ 400mm を切断する能力を有していることが確認できた。

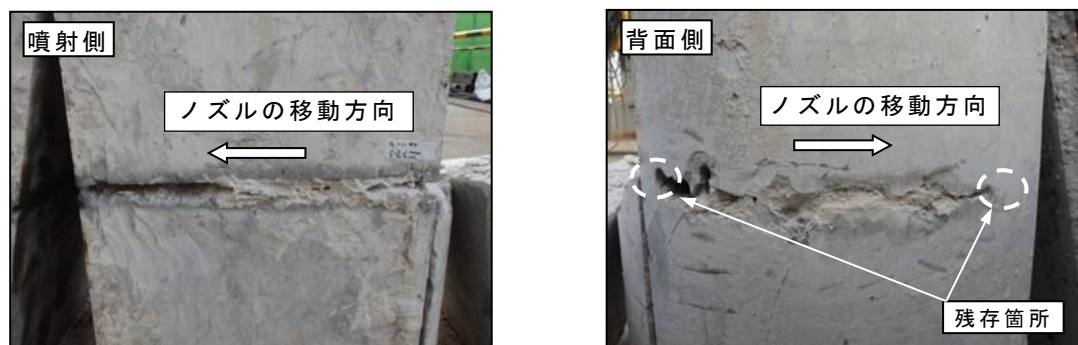
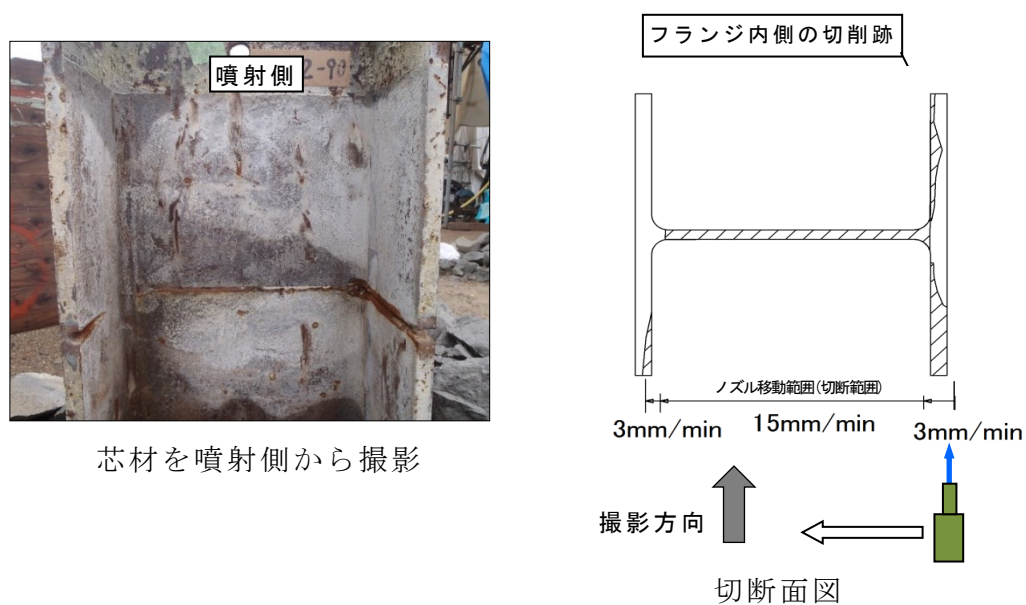


写真 5-12 芯材の設置角度 90 度の実験結果



芯材を噴射側から撮影

図 5-15 芯材の設置角度 90 度の切断状況

## 5-8-2-2 PIP 杭切断後の杭背面地盤の改良材置換え状況（その 1）

### 1) 芯材の設置角度 0 度の改良材置換え結果（実験番号 2-1）

図 5-16 の写真は、圧力容器の平面図に示すように、PIP 杭の背面側から模擬地盤を掘り出し、噴射方向から 0.95m の位置の切羽を撮影したものである。以下、図 5-17、図 5-18 も同様である。

切羽断面の下部左側は、概ね切断材から改良材に置き換わっていることが確認できる。一方、断面上部左側には空洞が残っている。これは実験 case1 の「図 5-9 超高压ジェットによる対象物の切削過程」に示すように、鋼材を完全に切断する前にノズルが移動するため、噴流が解放面に逃げる偏向現象が影響していると考えられる。さらに、芯材の設置角度 0 度ではウェブが噴流軸と平行になるため切断位置のズレが大きく、偏向した噴流が容器壁面に衝突し、上下左右に拡散したと考えられる。

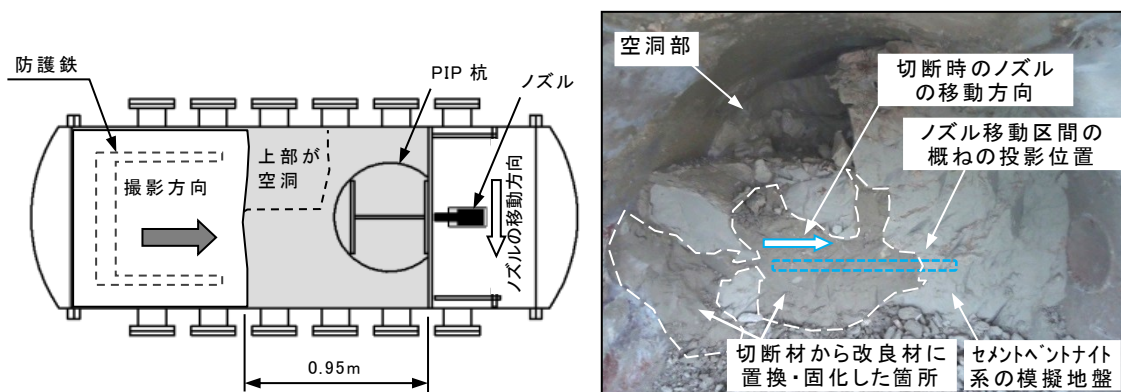


図 5-16 圧力容器と模擬地盤の改良状況（芯材の設置角度 0 度）

### 2) 芯材の設置角度 45 度の改良材置換え結果（実験番号 2-2）

芯材の設置角度 45 度の場合は、改良材の置換が不十分な状態であり、杭背面の直近から空洞が発生している。これは図 5-14 で確認されたモルタルの残存部が障壁となって、改良材の供給と空気の排出が阻害されたことが原因と考えられる。また、一部に改良材が集中し、改良材が硬化する前に流出するとともに空気溜まりが残る結果になったと考えられる。

なお、写真上部には、圧気供給用の空隙が見られる。

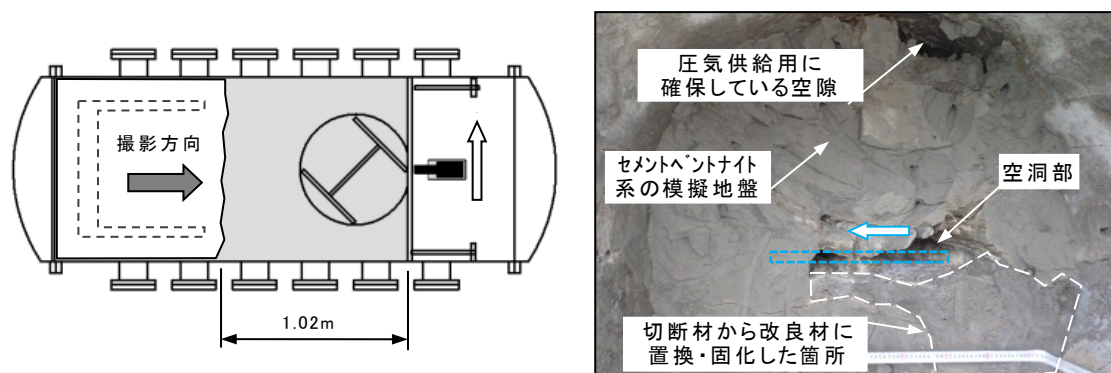


図 5-17 圧力容器と模擬地盤の改良状況（芯材の設置角度 45 度）

### 3) 芯材の設置角度 90 度の改良材置換結果（実験番号 2-3）

芯材角度 90 度の場合は，切断開始位置から圧力容器の壁面までの範囲に改良体が形成されており，改良材への置換えが概ね良好である．これは切断開始位置において噴射方向とフランジが水平に位置していることと，フランジの切断区間を 3mm/min の低速でノズルを移動することにより，フランジの切断時に偏向した噴流が圧力容器の壁面に衝突し，噴流がさらに上下に拡散し，杭背面の地盤が広い範囲で掘削された結果と考えられる．さらに，ウェブが全て切断され，障壁などの無い掘削範囲内に改良材が効率よく供給されたためと考えられる．なお，改良体の一部に見られる小さな空洞は，ノズルの移動ラインから上方に位置することから，空気溜まりが残ったと考えられる．写真上部には，圧気供給用の空隙が見られる．

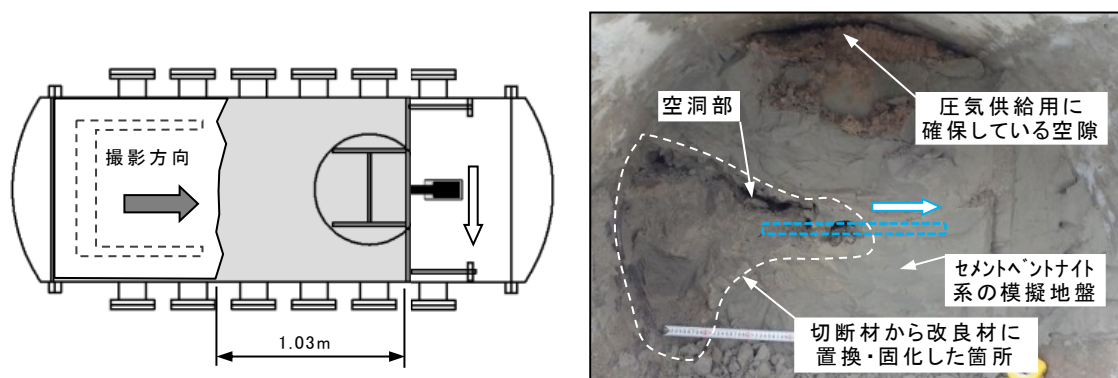


図 5-18 圧力容器と模擬地盤の改良状況（芯材の設置角度 90 度）

### 5-8-2-3 PIP 杭切断後の杭背面地盤の改良材置換え状況（その 2）

芯材の設置角度 0 度, 45 度, 90 度の全てにおいて, PIP 杭背面の地盤に空洞が生じた。空洞が生じた原因として以下の要因が考えられる。

- イ) PIP 杭切断時に噴流が掘削部に引き込んだ空気は, 改良材への置換え時に排出できなかった。
- ロ) PIP 杭背面の掘削範囲が広いため, 改良材噴射時のノズル移動速度が 200mm/min の高速では掘削部への改良材の充填が不十分である。

空洞が生じたため, PIP 杭背面に堆積した切断材の排出と改良材の置換を目的に実験を追加する。実験のパラメータを以下のように設定した。

#### ① PIP 杭芯材の設置角度

前述の模擬地盤内の切断結果から芯材の設置角度 0 度は, 他の設置角度に比べて杭切断時の掘削範囲に偏りが少ないため, 噴射条件等のパラメータと改良材への置換え状況との関連性を確認しやすいと考えられる。そのため, 芯材の設置角度を 0 度に固定して実験を行う。

#### ② 改良材噴射時のノズルの移動速度

ノズルを 200mm/min の高速で移動しながら改良材を噴射する方法は, 杭背面で乱流が発生し, 杭の切断時に引き込んだ空気が排出されずに内部に滞留すると考えられる。そのため, 改良材の噴射位置を固定し, 内部に滞留している空気を一方向から排出するとともに改良材の置換え効率の向上を図ることとする。

#### ③ 噴射圧力

固化反応前のセメントミルクが PIP 杭の噴射側に流出する原因の一つに, 245MPa の超高压の噴射が考えられる。また, 空気が噴射材に連行されて PIP 杭の背面側に浸入する現象も超高压の噴射が一因と考えられる。そのため, 改良材の噴射圧力を従来の 245MPa から超高压ジェットポンプの最小圧力 (30~50Mpa) まで低く設定し, これらの現象の抑制を図る。なお, 噴射圧力の低下に伴う流量の減少は, WJ ラインと AJ ラインの配合比が一定となるように調整する。

#### ④ ノズル径

切断用ノズルと地盤改良用ノズルの両方を装備しているが, 改良材噴射に切断用ノズルを使用し, その効果を確認する。同一のノズルの使用により, 杭の切断線と同じ位置から改良材を噴射し, 改良材の置換え効率の向上を図ることができる。また, 切断から改良材の置換に関わる段取り替えに要する時間を短縮することが可能になる。

# ⑤ 珪酸ナトリウム溶液の濃度

改良材の噴射圧力の低下により PIP 杭背面での改良材の滞留時間を増やす一方で、杭背面に確実に改良体を造成するためには、改良材の固化反応の調整が必要である。硬化反応速度を緩やかにして改良剤の到達距離を延ばすため、改良材に使用する珪酸ナトリウム溶液の濃度を地盤改良用の 20%から切断用の 15%に設定し、その効果を確認する。また、切断と改良に用いる珪酸ナトリウム溶液の濃度を同一にすることで段取り替えに要する時間を短縮することが可能になる。

# ⑥ 噴射量

総噴射量は、250L から 500L に倍増し、改良材の置換および充填性の向上を図る。

表 5-8 に追加実験（実験番号 2-4～2-7）のパラメータを示す。

実験番号 2-4～2-7 までの各パラメータは、直前の実験結果を踏まえて設定した。例えば、実験番号 2-5 のパラメータは、実験番号 2-4 の結果を基に噴射圧力や流量などを見直した。

表 5-8 追加実験パラメータ

実験番号		2-4			2-5			2-6			2-7			
PIP杭切断時の ノズルの移動方向 および速度														
		③	②	①	③	②	①	③	②	①	①	右側のフランジ とウェブは 事前に切断 し、圧力容器 内に設置した		
		ノズル移動長 (mm)		185	30	185	同左			同左			185	
		ノズル移動速度(mm/min)		10	3	10	同左			同左			10	
改良材の 噴射位置														
噴射圧力	(MPa)	30			50			30			30			
流量	(L/min)	44			57			44			44			
珪酸ナトリウム濃度	(%)	20			15			15			15			
ノズル径	(mm)	4												
総噴射量	(L)	500												

### 1) 実験番号 2-4 の改良材置換結果

図 5-19 に実験終了後の状況写真を示す．噴射側フランジから 0.97m 付近の改良材の置換えは，噴射方向に向かって右側の地盤に改良体が形成されており，空隙が無く，良好であった．ただし，噴射側フランジから 1.15m の模擬地盤中央付近に空洞が確認された．これは低圧力の噴射により噴射流速が低下した結果，空気の排出が不十分であったためと考えられる．

なお，写真上部に見られる空洞は，模擬地盤打設時に圧気供給用として残した空隙であり，以降の写真上部にみられる空洞も同様の圧気供給用の空隙である．

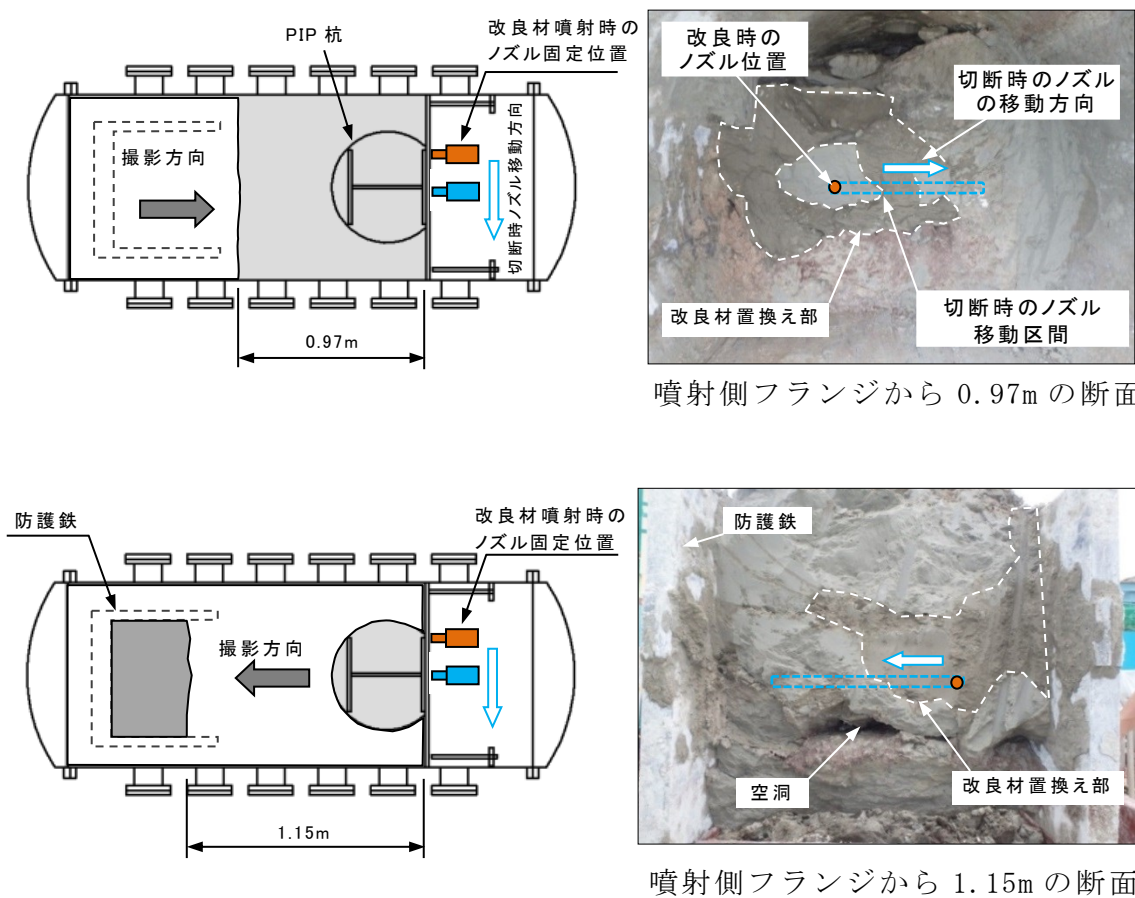


図 5-19 圧力容器と模擬地盤の改良状況



## 2) 実験番号 2-5 の改良材置換結果

実験 2-4 の結果を踏まえ、実験 2-5 は、以下のように噴射条件を変更して行った。

- ① 噴射圧力を 30MPa から 50MPa に上げる（総噴射量は変えずに噴射時間を調整する）。
- ② 改良材の噴射位置を切断開始地点から切断終了地点にする（切断材を排出するとともに、改良材に効率良く置換えることのできる噴射位置を探る）。
- ③ 珪酸ナトリウム溶液の濃度を 20% から 15% に減じる（硬化反応速度を緩やかにすることにより、改良材の到達距離の増加、また、切断時の珪酸ナトリウム溶液と同じ濃度を用いるとことにより段取り替えに要する時間の短縮を図る）。

図 5-20 に実験終了後の状況写真を示す。噴射側フランジから 0.68m 地点で噴射方向右側に空洞が残った状態であった。右側の空洞は、ウェブの切断時に切断遅れにより噴流が大きく偏向し、容器壁面に衝突して上下に拡散するために生じたと考えられる。切断終点側から噴射した改良材は、掘削範囲の広い切断開始点側に流れやすく、固化反応前に流出したと考えられる。また、このケースでは噴射圧力が高いほど改良材が流出しやすくなり、切断で生じた空洞の充填は困難と考えられる。なお、防護鉄板の内側も同様に空洞が多く見られた。

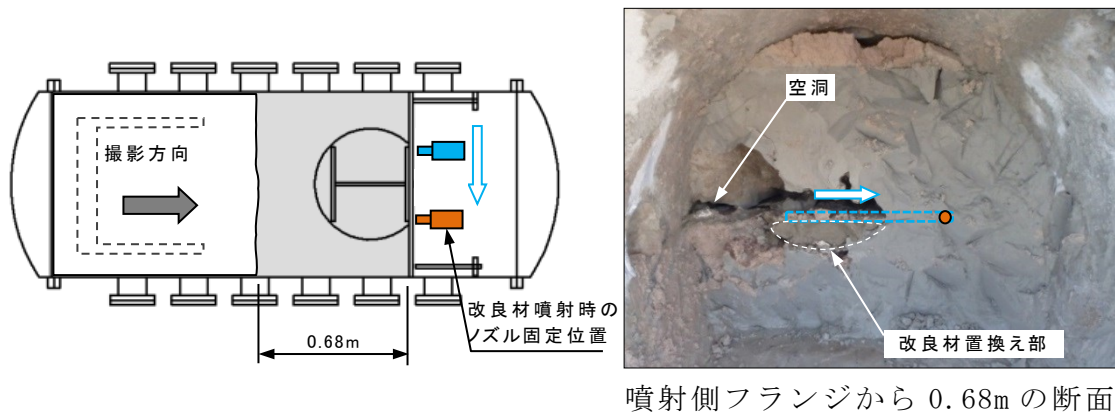


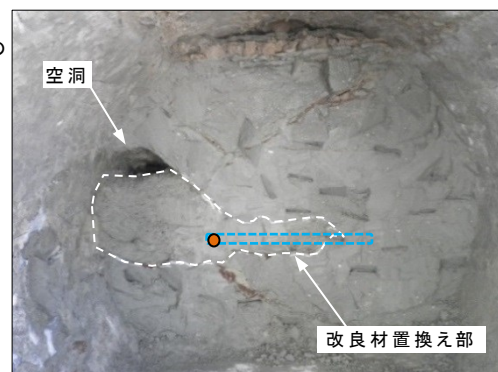
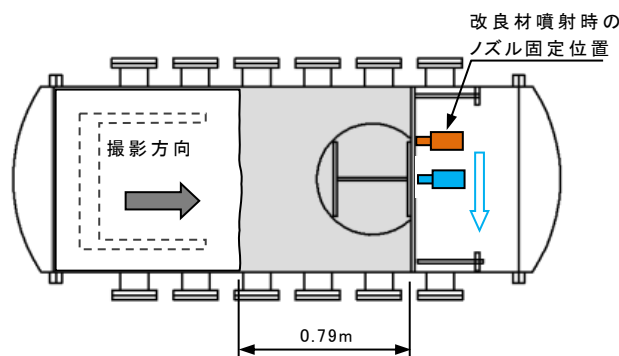
図 5-20 圧力容器と模擬地盤の改良状況

### 3) 実験番号 2-6 の改良材置換結果

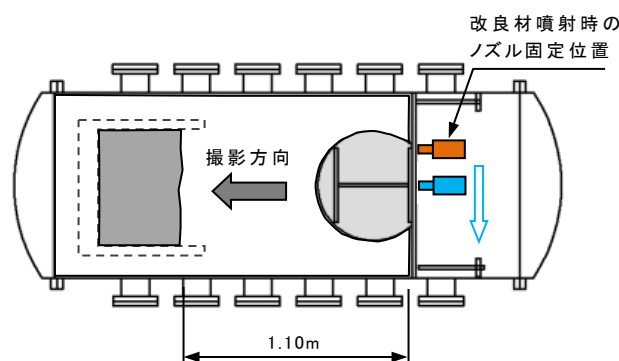
実験番号 2-6 は, 改良材の置換が良好であった実験番号 2-4 の噴射条件のうち, 珪酸ナトリウム溶液の濃度を 20% から 15% に変更して実験を行った. 図 5-21 に実験後の状況写真を示す.

噴射側フランジから 0.79m および 1.10m とともに改良材の置換え状況は良好であった. また, 実験番号 2-4 (図 5-19) で見られた防護鉄板内側に生じた空洞も見られなかった.

なお, 噴射側フランジから 0.79m 地点の右側上部の小さな空隙は, ノズルの移動範囲の上側に位置しており, エア溜まりとなって残ったものと考えられる. ノズルの移動範囲から上側の空隙は, 実験 2-5 と同様に, ウェブの切断時に切断遅れにより噴流が大きく偏向し, 容器壁面に衝突して上下に拡散するために生じると考えられる.



噴射側フランジから 0.79m の断面



噴射側フランジから 1.10m の断面

図 5-21 圧力容器と模擬地盤の改良状況



#### 4) 実験番号 2-7 の改良材置換結果

実験番号 2-5, 2-6 で確認された掘削範囲が上下に広がる現象は、圧力容器の大きさや形状に起因すると想定される。本実験では容器の形状の影響を受けないように切断を工夫し、改良材置換の効果を確認する。

芯材 H400 の端部から切断材を噴射しながらノズルを移動すると、図 5-21 の①に示すように切断の遅れにより噴流が偏向して圧力容器の壁面に衝突すると考えられる。この現象を解消するため、図 5-21 の②に示すように H400 の中心部から半断面に対して切断材を噴射することにした。

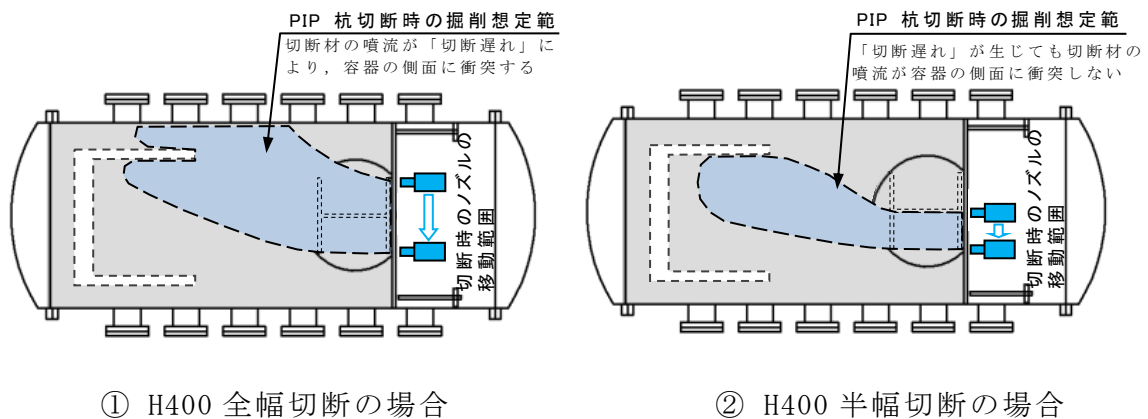


図 5-21 PIP 杭切断時の掘削想定範囲

実験は以下の手順で行う。

- 1) 図 5-22 に示すように、圧力容器内に PIP 杭を設置する。
- 2) 芯材 H400 の端部からフランジおよびウェブを切断する。
- 3) 模擬地盤を打設する。
- 4) 図 5-23 に示すように、芯材 H400 の中心部から切断を開始し、未切断部のフランジを切断する。
- 5) 切断後の芯材 H400 の中心部にノズルを固定し、改良材を噴射する。

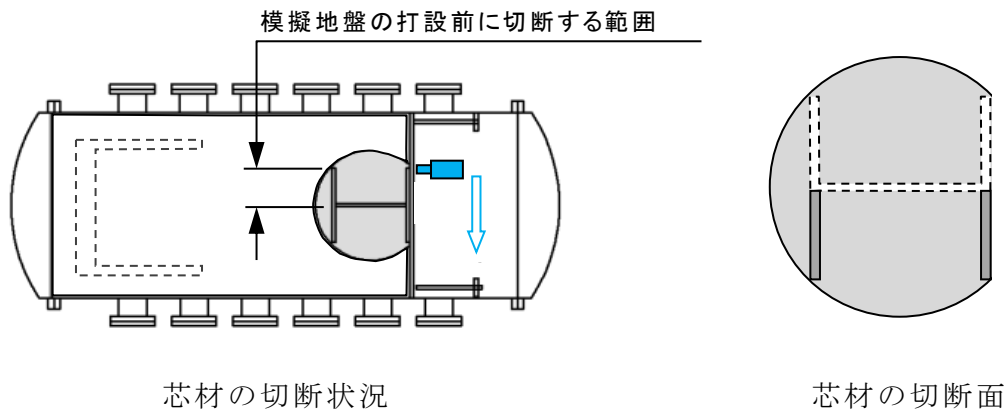
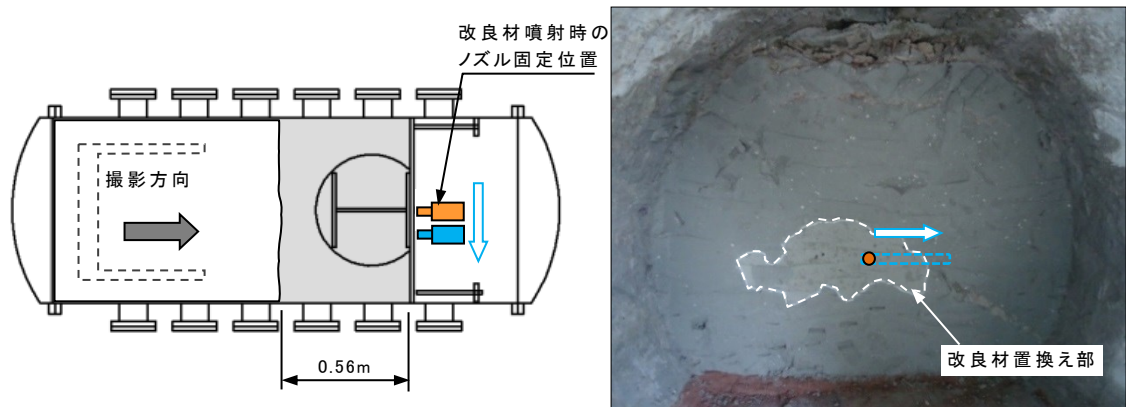
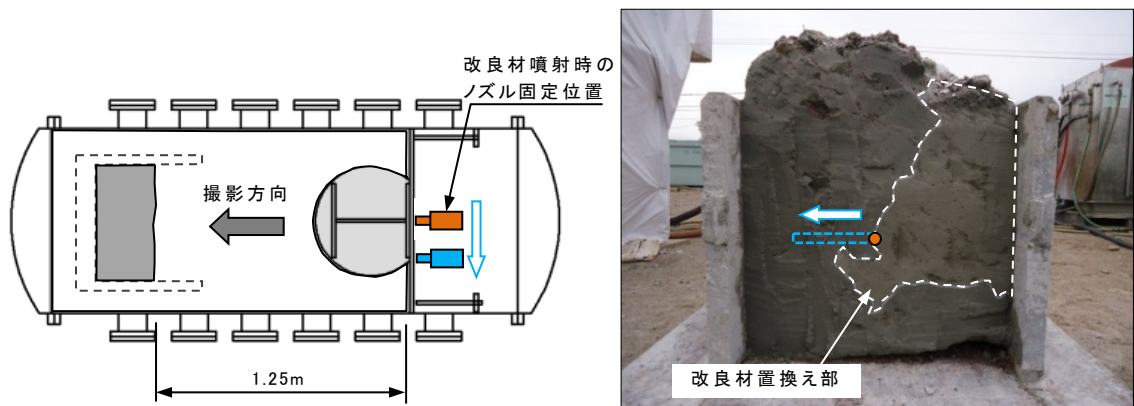


図 5-22 PIP 杭芯材の事前切断状況と切断面

図 5-23 に模擬地盤の改良状況を示す。杭背面から防護鉄板内までの全ての断面において、空洞が見られず改良材が充填していた。また、圧力容器の側面に改良材の付着が見られなかったことから、圧力容器の大きさや形状による影響を排除した環境では、切断材の噴射による掘削部分が改良材の噴射により空隙を残すことなく、改良体を形成できることが確認できた。



噴射側フランジから 0.56m の断面



噴射側フランジから 1.25m の断面

図 5-23 圧力容器と模擬地盤の改良状況

## 5-9 土中切断および改良体確認実験のまとめ

土中切断および切断後の改良材の置換えについて、各実験で得られた知見を以下に述べる。

### 5-9-1 土中切断

- (1) 圧気状態の土中では、ノズルの移動速度を的確に設定すれば、ノズルから噴射方向に向かって最も奥行きのあるPIP杭の芯材の設置角度45度の鋼材を切削する能力がある。
- (2) PIP杭の芯材の設置角度90度のフランジは、気中環境における実験と同様に、噴流軸と平行な部材でありながら、モルタル部の切削線に誘導された噴流による切削跡が見られる。
- (3) 切断に伴う掘削範囲は、PIP杭の芯材の設置角度に関わらず切断開始点側に広く分布する傾向がある。
- (4) 空洞の発生位置は、噴流の方向に対する芯材のフランジおよびウェブの角度や切断位置のズレにより噴流方向が偏向するために生じる。また、圧力容器内で偏向した噴流は、圧力容器の側壁に衝突して上下に拡散し、さらに空洞の規模を拡大する。

### 5-9-2 土中切断後の改良材の置換え

- (1) 超高压による改良材の噴射は、連行した空気がPIP杭の背面側まで浸入しやすくなるとともに、杭切断時に浸入した空気の排出が難しい結果となった。この結果を踏まえ、WJラインの噴射圧力を30MPa程度に設定した結果、空隙の少ない改良体が形成された。
- (2) 切断終点側からの改良材の噴射は、切断開始点付近の切断により広く掘削された範囲に流れ、固化反応前に流出し、空隙が残り易くなると考えられる。
- (3) 切断開始点に噴射位置を固定した結果、空隙の少ない改良体が形成された。
- (4) 珪酸ナトリウム溶液の濃度を20%から15%に減らし、改良材の硬化反応速度を調整した結果、空隙の少ない改良体が形成された。

## 5-10 まとめ

本実験の結果、限定圧気により地下水を排除した環境では、超高压ジェットの切断能力が向上し、600mm程度まで離れた位置の鋼材の切断が可能であるこ

とが確認できた。

すなわち、本工法は限定圧気の併用により、300mm を超える支障物に対して、従来の 2 回以上の切断・除去作業が 1 回で可能になり、作業の効率化および工期短縮等が期待できる。

なお、本実験は実際の現場を想定し、N 値 4 程度の粘性土地盤を対象に行なったため、条件が大幅に異なる土質に適用する場合は、支障物の切削性や切断後の改良材の置換について事前に詳細な検討を行うなど留意を要する。

今後、こうした実験や現場での検討を積み重ねることで、切削能力の向上等が期待できると考える。

## [参考文献]

- 1) D0-Jet 工法技術資料 2012 D0-Jet 工法研究会
- 2) 非開削による地中障害物対応システムに関する調査作業委託その5報告書  
東京都下水道サービス株式(株), 鹿島建設(株), 2011
- 3) 最新ウォータージェット工法 八尋暉夫 鹿島出版会 pp.71-72



## 第 6 章 結論

### 6-1 本研究の結論

#### 6-1-1 D0-Jet 工法の小・中口径トンネルへの適用拡大

第 3 章では、これまで適用範囲外であった小・中口径トンネルへの D0-Jet 工法の適用拡大に向けて実施した各種実験結果について述べた。

D0-Jet 工法は、推進工法またはシールド工法の掘進機に、超高压ジェットと低压ジェットを混合して噴射する 2 液混合噴流を用いた超高压噴射システムを搭載し、地中に残置された鋼矢板やコンクリートパイルなどの支障物を切断および除去し、また、地盤改良などを行う工法で、「前方探査技術」、「超高压地盤改良技術」、「切断および除去技術」の 3 つの技術を有し、口径 1500 mm 以上の大口径を対象としたトンネル施工技術である。

一方、本工法の採用拡大がなされていく中で、小・中口径の需要が顕在化してきた。このため、著者らは、本工法を小・中口径断面に適用するための研究に着手した。この種の機械をダウンサイジングするには、地盤との関係も踏まえると模型による性能確認は現実的ではないと考え、小・中口径を代表する口径として、口径 1500mm に対して断面積で 50% 以下の口径 1000 mm の試作機を製作し、この機械を実験フィールドの試験地盤内に設置して先の 3 技術の性能などを実際に評価する方法を採った。

前方探査技術は、音響センサなどで得られた情報を基に支障物の位置や材質、形状および寸法と支障物の範囲を解析するために開発したシステムを用いた技術である。前方探査技術の性能を確認するために試験用の地盤を築造し、この試験地盤内に支障物として H 形鋼を設置し、掘進機前方の探査を行い、前方探査の所要の機能を満たした動作が行えるかどうかの稼働状況と前方探査の作業性および安全性について、それぞれ確認を行った。

超高压地盤改良技術は、周辺の地盤および構造物等に影響を与えることなく地中の支障物を切断および除去するために掘進機から地盤改良を行うことができる技術である。掘進機に地盤改良を行うシステムを取り付け、改良中の排泥の性状や切羽土圧、改良体の強度、超高压地盤改良による地盤への影響などの調査を行い、地盤改良技術の性能、作業性および安全性等について、それぞれ確認を行った。

切断技術は、掘進機に、切断ノズル等で構成する切断システムを装着し、切断ノズルより超高压で切断材を噴射して地中の支障物を切断する技術である。試験地盤を築造し、前方探査の後、切断ノズルより切断材を超高压で噴射し、支障物の H 形鋼の切断を行い、切断システムの機能、作業性および安全性等に

ついて、それぞれ確認を行った。また、切断した支障物の除去については、切断片を掘進機内に取込んで回収し、切断片のチャンバー内等への取込み状況やチャンバー内等から回収された切断片の寸法を確認するとともに、掘進機周辺の試験地盤を掘削し、チャンバー内等に取り込まなかった切断片の確認と回収率を調査した。

上記のように口径 1000mm の試作機を用いて、「前方探査技術」、「超高圧地盤改良技術」、「切断および除去技術」に関する各種性能を確認する実験を行った。その結果、地中の支障物の位置等の確認、地盤改良、支障物の切断および除去、切断片の回収能力が従来の掘進機と概ね同等であること、掘進の施工が滞りなくできること、作業性、安全性に問題ないことを明らかにし、小・中口径でも実用化が可能で有効な技術であることを確認した。

#### 6-1-2 D0-Jet 工法における 2 液混合噴流が地盤等へ与える影響の解明

第 4 章では、D0-Jet 工法における 2 液混合噴流が、地盤を掘削する際の特徴について研究を行い明らかとなった事項について述べた。

D0-Jet 工法の 2 液混合噴流による周辺地盤への影響やその影響範囲は、実験フィールドにおける実験的研究により確認しているものの、既設地下構造物等への影響は施工中の計測や観測が困難なため、いまだ未解明の状況にあった。

このため、2 液混合噴流が既設地下構造物等に与える影響を検討するための実験用の圧力容器を作製し、2 液混合噴流の動圧分布の測定、地盤の掘削実験および FVM 解析を行った結果、地盤改良用の混合噴流はジェットグラウト等の一般の噴射式地盤改良と同程度の圧力となっており、コンクリート構造物を損傷する可能性はないことを確認した。また、砂質土、粘性土を想定したいずれの模擬地盤の場合も、掘削面はほぼ扁平な形状を維持しながら地盤の掘削が進行することなどを確認した。さらに、FVM 解析によって地盤の掘削過程および掘削領域内の流動特性をよい精度でシミュレートできることを示すなど、本研究の結果で得られた知見を述べた。

これらの研究により得られた知見は、2 液混合噴流を用いた D0-Jet 工法を実際の工事現場で適用するにあたり、混合ノズルの効率化、改良範囲の推定、近接構造物への影響の評価などに活用できることを明らかにした。

#### 6-1-3 D0-Jet 工法における 2 液混合噴流の支障物の切削性の解明

第 5 章では、大深度で大型の支障物が残置されている現場を対象に、支障物の切削性や切削後の改良材の置換に関する研究を行い、明らかとなった事項について述べた。



東京都下水道局では、地下鉄工事施工時に大型の支障物が残置されている場所で、下水道管きょをシールド工法で施工することになった。この現場は、地下水位が高い軟弱な沖積層（有楽町層下部粘性土層）に位置し、土被り約 30 m と埋設深度が深いため、本工事を対象に D0-Jet 工法の適用性の検討を行った。D0-Jet 工法では、確実に切断可能な支障物の奥行きは 300mm 程度であり、これを超える支障物には 2 回以上の切断および除去の工程が必要となるため、作業の効率化が課題となっている。

この課題に対しては、実験的に有効性を確認している限定圧気工法を併用して掘削中の切羽を気中状態とし、超高压ジェットの切断能力を向上させる方法が考えられる。この章では、大型の圧力容器を用いて限定圧気状態における支障物の切断能力を把握するために行った実験とその結果を述べた。切断実験は、切断が困難な状況を想定し、圧力容器内に造成した N 値 4 程度の模擬粘性土地盤に PIP 杭の芯材の設置角度を 0 度、45 度、90 度として行った。

この実験から、超高压ジェット噴流を限定圧気状態で使用することにより切断能力の減衰が抑制され、ノズルからの距離が 600mm 程度の位置にある鋼材の切断が可能であることが確認できた。このことは、ノズルの移動速度を適正に設定すれば、H400 を芯材とする PIP 杭に対して、従来まで 2 回以上の切断と除去を必要としていた作業を 1 回の作業で切断することが可能となり、作業効率の向上や作業時間の短縮が可能であることを示している。さらに、切断後に切断材を改良材に置き換える場合には、噴射圧力を 30MPa に設定し、噴射位置を切断開始地点に固定するなど空隙の少ない改良体を造成できることが確認できた。

本研究による知見は D0-Jet 工法の施工技術の向上につながり、今後のトンネル施工の発展と新たな可能性に寄与するものと考えられる。

## 6-2 今後の課題

本研究では、これまで適用範囲外であった小・中口径トンネルにおける本工法の基本性能を評価し、実用化可能な技術であることを明らかにした。

しかし、小・中口径の掘進機内は排泥管や油圧ホース、カッターモータ等が混在しており、作業スペースが狭くなる。このため、施工を積み重ねる中で、作業の効率性や安全性の向上のため各種機器類の小型化などを図っていく必要がある。

次に、地盤改良用の超高压 2 液混合噴流がコンクリート構造物を損傷する可能性はないことなどを確認した。

しかし、現状では噴流の動圧分布などの地盤中の挙動や地盤改良範囲について施工中の計測が困難となっている。このため、今後は計測機器の開発を含め、

本工法による施工現場での計測および計測データと本研究との比較を研究課題として取り組み, 本工法の安全性および施工性のさらなる向上を図っていく必要がある.

最後に, D0-Jet 工法は多くの現場で施工実績があるが, 今後の拡大に向けては, ジェットノズルの長寿命化など, コスト縮減にも取り組んでいく必要がある.

## 謝 辞

本論文は、著者が再構築事業における施設建設の責任者として設計や工事を指揮する立場になった折、推進工事やシールド工事において鋼矢板やH形鋼などの仮設材が土中に残置された現場に多く遭遇し、これが工事を施工する上で障害となり、事業の推進に危惧を持ったことなどが動機となりました。

早稲田大学理工学術院創造理工学部教授小泉淳博士には、このような課題の解決のために様々なアドバイスを頂く中で、これまでの研究成果を論文としてまとめるようにとのご指導を賜り、ここにどうにかまとめ上げることができました。論文全般にわたり、全体構成から一字一句の表現まで懇切丁寧なご指導、ご教示を賜り心より御礼申し上げます。

また、早稲田大学理工学術院創造理工学部教授赤木寛一博士、同関根正人博士、同小峯秀雄博士には、論文作成において専門的見地から貴重なご意見、ご助言を頂きました。ここに、深く感謝申し上げます。

さらに、東京都下水道サービス株式会社小川健一社長(元東京都下水道局長)ならびに同社顧問高橋良文博士からも、長年の研究成果を1つの論文としてまとめて世に出すことを強く勧められ、これが本論文上梓のきっかけとなりました。

また、このような経緯のもと、論文作成の諒解と励ましを頂いた東京都下水道局渡辺志津男局長に、御礼とともに深く感謝申し上げます次第です。

調査研究に際しては、再構築事業の立ち上げ当時から若輩の著者を上司としてご指導して下さった東京都下水道サービス株式会社岩佐行利部長に数々のアイデアを頂くとともに、多くのご苦勞をおかけしました。また、同社の田中雅彦課長代理をはじめ、杉本克美技術開発課長、鈴木秀典統括課長代理の各氏の熱心な取り組みにより成果を導き出すことができました。鹿島建設株式会社技術研究所磯部隆寿氏には数値解析や実験に多大な協力を頂きました。N.JET エンジニアリングの志村洋平氏には実験に当たり施工現場で遭遇する課題等を提供して頂きました。ここに、心より感謝を申し上げます次第です。

多忙な業務と並行して論文作成を行ってきた関係から、関連資料の収集や作成など様々な場面でご協力頂いた東京都下水道局藤橋知一課長、川上直之課長、家壽田昌司課長、中井宏課長、武藤真課長、日高ちはる主任の各氏に改めて御礼申し上げます次第です。

ここに、多くの方々のご支援、ご協力によりまとめ上げることができた本論文が、今後の東京都の下水道事業のみならず都市トンネル工事の推進に役立つことを切に願うものです。最後に、学位の取得に甘んじることなく、さらなる下水道事業の推進に向けた決意を肝に銘じつつ、陰で支えてくれた家族とともにこの慶びを分かち合いたいと思います。



## 研 究 業 績 ( 1 / 3 )

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
a. 論 文	
○1)	<u>神山守</u> ，小泉淳，磯部隆寿，田中雅彦，志村洋平：支障物撤去型掘進工法における地盤改良用二液混合噴流の地盤掘削特性に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学），Vol.73，No.2，pp.88-99，2017 年
○2)	<u>神山守</u> ，小泉淳，磯部隆寿，杉本克美，志村洋平：限定圧気工法を併用した D0-Jet 工法の支障物切断性能に関する実験的研究，第 9 回日中シールド技術交流会論文集，pp.60-65，2017 年 8 月
○3)	<u>神山守</u> ，磯部隆寿，岩佐行利，小泉淳：D0-Jet 工法における超高圧 2 液混合ジェット噴流の影響範囲に関する実験的研究，日本トンネル技術協会誌，トンネルと地下，Vol.47，No.11，pp.47-52，2016 年 11 月
4)	Motonobu Ito， <u>Mamoru Kamiyama</u> ，Yukitoshi Iwasa，Jorg Steinhardt：Applicability of Water Surface Control Device which is Debris Separation Technology Combined Sewer System，8th International Conference on Sewer Processes and Networks，pp.359-377，2016 年 9 月
5)	松井健一， <u>神山守</u> ：公共工事コスト縮減対策に関する検討，土木研究センター，土木技術資料，Vol.43，No.4，pp20-25，2001 年 4 月
b. 報 告	
○1)	岡本順， <u>神山守</u> ，坂本久之：地中支障物対策を駆使したシールド施工ー東京下水道王子西一号幹線ー，日本トンネル技術協会誌，トンネルと地下，Vol.47，No.8，pp.59-67，2016 年 8 月
c. 講 演	
1)	<u>神山守</u> ，岸田真，溝口宏樹：総合的な建設事業コスト評価指針（試案）について，土木学会年次学術講演会講演概要集第 6 部，Vol.57，pp.797-798，2002 年 9 月

## 研 究 業 績 ( 2 / 3 )

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
2)	<u>神山守</u> ，藤本聡，溝口宏樹，杉谷康弘：建設コストの構造分析を通じたコスト縮減効果の試算，土木学会建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，Vol.19，pp.23-26，2001年11月
3)	<u>神山守</u> ，藤本聡，松井健一，河上誠：外部コストを組み入れた建設事業の評価に関する検討，土木学会年次学術講演会講演概要集第6部，Vol.56，pp.512-513，2001年9月
4)	<u>神山守</u> ，小路泰広：外部コストを組み入れた建設事業コストの低減について，土木学会地球環境シンポジウム講演論文集，Vol.9，pp.309，2001年7月
5)	河上誠，藤本聡，松井健一， <u>神山守</u> ：外部コストの内部化による価格変動について，土木学会建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，Vol.18，pp.31-38，2000年11月
6)	杉谷康弘，藤本聡，松井健一， <u>神山守</u> ：コスト縮減に関する進め方に関する提案，土木学会建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，Vol.18，pp.23-30，2000年11月
7)	松井健一， <u>神山守</u> ，福田至：公共工事の平準化の動向に関する一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集第6部，Vol.55，pp.370-371，2000年8月
d. その他 (総説)	
1)	<u>神山守</u> ，岩佐行利，伊藤元暢：海外企業と水面制御装置の共同研究成果をSPN8で発表，環境新聞社，月刊下水道，Vol.39，No.14，pp.75-80，2016年11月
○2)	<u>神山守</u> ：下水道とトンネル技術，日本トンネル技術協会誌，トンネルと地下，Vol.43，No.11，pp.5-6，2012年11月

# 研 究 業 績 ( 3 / 3 )

種 類 別	題名，発表・発行掲載誌名，発表・発行年月，連名者（申請者含む）
○3)	<u>神山守</u> ：東京都における豪雨対策，日本下水道協会誌，Vol.46，No.560，pp.14-17，2009年6月
4)	<u>神山守</u> ：「10年後の東京」構想と下水道事業，環境新聞社，月刊下水道，Vol.32，No.2，pp.22-25，2009年1月
○5)	<u>神山守</u> ：幹線調査はどのように行えばいいのですか？，環境新聞社，月刊下水道，Vol.31，No.6，pp.34-37，2008年4月
○6)	<u>神山守</u> ：下水道管きよの損傷・劣化と維持管理，土木施工，Vol.48，No.12，pp.102-106，2007年12月
7)	<u>神山守</u> ：東京都におけるリスクコミュニケーションへの取組み，環境新聞社，月刊下水道，Vol.30，No.10，pp.62-65，2007年7月
8)	松井健一， <u>神山守</u> ，河上誠：内部コストの実態把握，外部コストの内部化手法調査，土木研究所資料，No.3828，pp290-291，2001年3月
9)	<u>神山守</u> ：ライフサイクルコスト分析に基づく計画的な再構築，環境新聞社，月刊下水道，Vol.21，No.3，pp.26-28，1998年3月
(著書)	
○1)	<u>神山守</u> （編纂委員会幹事長）他：続日本下水道史 技術編，日本下水道協会，2016年3月
○2)	<u>神山守</u> （下水道施設計画・設計指針改定調査専門委員会主査）他：下水道施設計画・設計指針と解説，日本下水道協会，2009年9月
3)	<u>神山守</u> 他：土木技術者のための原価管理，土木学会建設マネジメント委員会，2001年11月

